



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LAS INUNDACIONES EN SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

Trabajo realizado por:

Andrés Rodríguez Gutiérrez

Dirigido:

Andrés García Gómez

César Álvarez Díaz

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Mención:

Hidrología

Santander, junio de 2019

Título

Estudio de soluciones para las inundaciones en Santiago de los Caballeros

Autor

Andrés Rodríguez Gutiérrez

Directores

Andrés García Gómez

César Álvarez Díaz

Convocatoria

Junio de 2019

Palabras clave

Inundación, mitigación de inundaciones, aprovechamiento urbano, Republica Dominicana, Santiago de los Caballeros.

Resumen

El cambio climático es uno de los temas de actualidad que más afecta a las generaciones futuras y cuyos efectos, son una innegable realidad, ya hoy. Diariamente son temas de actualidad, inundaciones, tsunamis, huracanes, etc. De una magnitud mayor a la registrada con anterioridad, en la mayor parte de los casos.

Por otro lado, Centroamérica es una de las regiones que ha sufrido un crecimiento demográfico mayor durante los últimos años, obligando a las ciudades a extenderse de manera desmesurada concentrando a la mayor parte de la población en zonas donde no se han habilitado los servicios de drenaje, alcantarillado o evacuación de avenidas adecuados. Es el caso de la ciudad de Santiago de los Caballeros, la segunda por población de la República Dominicana, y que, en el año

2007, sufrió una de las mayores inundaciones de su historia, causando numerosas víctimas mortales y grandes daños materiales.

Uno de los principales problemas que provocaron las inundaciones, fue además de la ubicación de las viviendas en zonas inundables, el mal estado del cauce del río Yaque del Norte que cruza la ciudad de sur a norte.

Este trabajo va a tratar de presentar diversas soluciones para evitar las posibles inundaciones en la ciudad de Santiago de los Caballeros por el desbordamiento del cauce del río Yaque del Norte o sus 3 principales afluentes los arroyos Hondo, Guazumal y Gurabao.

Para ello se va a realizar en primer lugar una descripción detallada del problema donde se identifiquen los principales factores de riesgo y se describan las características demográficas, geográficas e hidráulicas del área de la cuenca del río Yaque del Norte. Realizando una descripción además del clima de la zona de estudio y del estado de las presas de Bao y Tavera que pertenecen a la misma cuenca hidrográfica y culla correcta gestión va a permitir realizar este estudio en el régimen natural del río.

Posteriormente se va a presentar un estudio hidrológico de la situación actual donde se van a extraer para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años los hidrogramas de avenida del cauce principal y sus afluentes que puedan servir como punto de partida al planteamiento de alternativas.

A continuación, se realizará un estudio hidráulico de la situación del cauce en su estado actual y se propondrán tres posibles medidas de mitigación de las inundaciones por desbordamiento del cauce principal, teniendo siempre en cuenta el desarrollo urbanístico actual y tratando de maximizar la generación de nuevos espacios urbanos tanto para la ciudad como para futuros desarrollos urbanísticos.

Así mismo se llevará a cabo un estudio económico de las medidas de mitigación propuestas que serán combinables entre si para poder adaptarse a las diferentes zonas del cauce del río en su recorrido de más de 11km por el interior de la ciudad y se valorarán los diferentes precios para los periodos de retorno elegidos evaluando la necesidad de realizar la intervención para mayor o menor protección en función del posible riesgo para la población y la ciudad.

Por último, se elaborará un resumen de las alternativas teniendo en cuenta diversos puntos de vista como el riesgo, el coste, la integración paisajística o el aprovechamiento urbano tras llevar a cabo las medidas que permita una toma de decisiones bajo el mayor número de variables analizadas.

Bibliografía Básica

Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros (2014) *Demografía de Santiago de los Caballeros República Dominicana*. Available at: <https://santiagodeloscaballeros.gob.do/demografia/>

Carmona, M. (2015) *EL MODELO HEC-HMS*. Universidad de Sonora. Available at: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20338/Capitulo7.pdf> (Accessed: 30 June 2018).

Chow, V., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1994) *Hidrología Aplicada*. New York: Mc Graw Hill.

Linsley, R., Kohler, M. and Paulhus, J. (1967) *Hidrología para ingenieros*. Madrid: McGraw-Hill.

Soil Conservation Service (1989) *Hydrology Training Series. Runoff Curve Number Computations. Study Guide*. Washington. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1082993.pdf (Accessed: 1 July 2018).

Title

Study of solutions for flooding in Santiago de los Caballeros

Author

Andrés Rodríguez Gutiérrez

Directors

Andrés García Gómez

César Álvarez Díaz

Date

June, 2019

Keywords

Flooding, flash flood protection, land use, Dominican Republic, Santiago de los Caballeros.

Abstract

Climate change is one of the topics currently under the public spotlight with the greatest repercussions for future generations. Its symptoms are nowadays an undeniable truth. There are daily news regarding floods, tsunamis, hurricanes, etc. In most cases, these present higher magnitudes than previously recorded.

On the other hand, Central America is one of the regions that has suffered a steeper demographic growth during last years, forcing cities to expand in an excessive manner, so people settle in zones with no drainage, sewers, or flash floods protection. This is the case of Santiago de los Caballeros, the second most populated city in the Dominican Republic, which suffered in 2017 one of the most intense floods in history, with many dead and severe property damage.

One of the main reasons for these inundations was, besides the presence of houses on flood areas, the inadequate state of the river Yaque del Norte, which crosses the city from south to north.

This work aims to present several solutions to prevent possible inundations in Santiago de los Caballeros city caused by the overflow of Yaque del Norte river and its three main tributaries streams: Hondo, Guazumal, and Gurabao.

To this end, the first step will be to describe in detail the problem, enumerating the main risk sources; and characterizing the relevant aspects of the environment: demographic, geographic, and hydraulic properties of the Yaque del Norte river basin; local climate; and the condition of the Bao and Tavera dams, which belong to the watershed under study and that will enable, thanks to proper management, to carry out this study under natural flow regime conditions.

Then, a hydrological study will be presented, showing the current situation and the flood hydrographs for the main and tributary streams using return periods of 10, 100, and 500 years. It will be the foundation of the search for alternatives.

After that, a hydraulic study of the riverbed current situation will be used to propose three possible mitigation measures of mainstream flooding, considering present urban development and trying to maximize the generation of new urban spaces for both the city and future urban projects.

In addition, the proposed mitigation measures and how to combine them to respond to the different conditions alongside the 11 kilometres of the river through the city of will be economically evaluated. Their different costs will be weighed against the possible risks for the city and the population, which depend on the return period being considered.

The last task will be a summary of the alternatives, taking into account how different aspects such as risk, cost, visual pollution or land use would be affected. It should help decision makers to consider the all the factors analysed in this study.

Basic Bibliography

Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros (2014) *Demografía de Santiago de los Caballeros República Dominicana*. Available at: <https://santiagodeloscaballeros.gob.do/demografia/>

Carmona, M. (2015) *EL MODELO HEC-HMS*. Universidad de Sonora. Available at: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20338/Capitulo7.pdf> (Accessed: 30 June 2018).

Chow, V., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1994) *Hidrología Aplicada*. New York: Mc Graw Hill.

Linsley, R., Kohler, M. and Paulhus, J. (1967) *Hidrología para ingenieros*. Madrid: McGraw-Hill.

Soil Conservation Service (1989) *Hydrology Training Series. Runoff Curve Number Computations. Study Guide*. Washington. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1082993.pdf (Accessed: 1 July 2018).

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivo.....	5
3. Planteamiento del problema	6
3.1. Descripción de la zona de estudio	6
3.2. Clima de la zona de estudio	9
3.2.1. Precipitaciones.....	9
3.2.2. Curvas IDF	10
3.3. Inundaciones	11
3.3.1.1. Antecedentes de inundaciones	11
3.3.1.2. Riesgo de inundación: definición.....	13
3.4. Cuenca del Río Yaque del Norte	16
3.4.1. Usos del suelo	19
3.5. La Presa de Tavera y de Bao	20
3.6. Asentamientos urbanos.	22
4. Metodología.....	24
4.1. Estudio hidrológico	25
4.1.1. Procedimeinto.....	25
4.1.2. Software.....	26
4.1.2.1. ArcGis	27
4.1.2.2. Hec-Hms	27
4.2. Estudio Hidráulico.....	29
4.2.1. Proceso	29
4.2.2. Modelo empleado.	30
5. Resultados	31
5.1. Estudio Hidrológico	31

5.1.1.	Definición de la cuenca.....	31
5.1.2.	Número de curva.....	33
5.1.2.1.	Tipo de suelo	34
5.1.2.1.	Umbral de escorrentía	36
5.1.3.	Tiempo de concentración	38
5.1.4.	Curvas IDF	39
5.1.5.	Hietograma de avenida	41
5.1.6.	Hidrogramas de avenida.....	46
5.1.7.	Caudales máximos de avenida.....	49
5.2.	Estudio Hidráulico.....	50
5.2.1.	Caracterización geométrica previa.....	50
5.2.2.	Rugosidad del canal	53
5.2.3.	Situación actual	54
5.2.4.	Soluciones propuestas.....	56
5.2.4.1.	Encauzamiento del canal	60
5.2.4.2.	Encauzamiento parcial	63
5.2.4.3.	Generación de lagunas de inundación.....	65
5.2.5.	Comparativa niveles de agua	69
5.2.6.	Estudio económico.....	71
5.2.7.	Valoración global alternativas.....	74
6.	Conclusiones	76
7.	Bibliografía.....	78

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Ciudades con programas de desarrollo del BID	2
Figura 2: Previsión media lluvias diarias hasta 2099 (Hall et al., 2013)	3
Figura 3: Ubicación de Santiago de los Caballeros en la República Dominicana (Fuente OSM).....	7
Figura 4: Incorporación de ciudades al programa CES (Fuente BID) .	8
Figura 5: Precipitaciones acumuladas en un entorno de 31 días y bandas de confianza 25-75% y 10-90% (Fuente weatherspark.com)	9
Figura 6: Curvas IDF (Fuente datos: IHCantabria)	10
Figura 7: Apertura de compuertas en la presa de Tavera por las inundaciones de 2007 (Fuente: tenarenses.com)	13
Figura 8: Inundaciones de 2016 (Fuente: BID)	13
Figura 9: Riesgo de inundación en la República Dominicana por provincias (Fuente: (Gómez De Travesedo, Saenz Ramírez and Ejecutivo, 2009)).....	14
Figura 10: Diagrama explicativo del riesgo (Fuente: (Gómez Coma, 2018))	15
Figura 11: Ubicación de la cuenca del río Yaque del Norte con el cauce y los principales afluentes (Fuente: elaboración propia mapa: OSM)	17
Figura 12: Subcuencas que forman parte de la cuenca principal del río Yaque (Fuente: elaboración propia mapa: OSM)	18
Figura 13: Área de estudio (Fuente: Elaboración propia, mapa: OSM)	19
Figura 14: Mapa de los usos del suelo en la República Dominicana (Fuente: GlobCover, 2009).....	20
Figura 15: Canal que une las presas de Tavera y Bao (Fuente: Wikimedia)	21
Figura 16: Aliviadero de la presa de Tavera (Fuente: El Nuevo Diario)	22

Figura 17: Áreas de expansión Santiago de Los Caballeros (Fuente: Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros)	23
Figura 18: Metodología general	24
Figura 19: Proceso para realizar el estudio hidrológico.	26
Figura 20: Proceso para realizar el estudio hidráulico.....	29
Figura 21: Áreas de inundación.....	31
Figura 22: Subcuencas a estudiar.....	32
Figura 23: Usos del suelo en la zona a estudiar (GlobCover, 2009)	34
Figura 24: Conceptualización del problema en el modelo HEC-HMS	41
Figura 25: Precipitaciones para intervalos de 0.33 horas	42
Figura 26: Precipitaciones para intervalos de 0.5 horas.....	43
Figura 27: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 10 años de retorno.....	43
Figura 28: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 100 años de retorno.....	44
Figura 29: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 500 años de retorno.....	44
Figura 30: Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 10 años de retorno	45
Figura 31: Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 100 años de retorno	45
Figura 32: Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 500 años de retorno	46
Figura 33: Hidrogramas para T = 10 años de los afluentes del Yaque	47
Figura 34: Hidrogramas para T = 100 años de los afluentes del Yaque	48
Figura 35: Hidrogramas para T = 500 años de los afluentes del Yaque	48
Figura 36: Hidrogramas de avenida del Yaque para 10, 100 y 500 años de retorno	49

Figura 37: Conceptualización del caudal con ARC-MAP y HEC GEO RAS	51
Figura 38: Conceptualización 3D de la geometría del cauce y las secciones en HEC RAS	52
Figura 39: Conceptualización geométrica en planta	52
Figura 40: Posibles valores de la rugosidad (Chow, 1959)	53
Figura 41: Mapa de inundaciones para T=10	54
Figura 42: Mapa de inundaciones para T=100	55
Figura 43: Mapa de inundaciones para T=500	55
Figura 44: Sección tipo cajón.....	57
Figura 45: Sección tipo senda	58
Figura 46: Sección tipo senda inundada	58
Figura 47: Sección con laguna de inundación	59
Figura 48: Sección con laguna de inundación inundada.....	60
Figura 49: Vista aérea de las secciones encauzadas	62
Figura 50: Efecto del muro sobre las viviendas	63
Figura 51: Sección tipo cajón con inundación.	63
Figura 52: Vista aérea de la solución con encauzamiento parcial	64
Figura 53: Ubicación de la laguna de inundación, propuesta inicial (amarillo + naranja), propuesta final (amarillo)	66
Figura 54: Inundación con laguna para T=10	67
Figura 55: Inundación con laguna para T=100.....	67
Figura 56: Inundación con laguna para T=500.....	68
Figura 57: Vista aérea de la solución con lagunas de inundación	68
Figura 58: Comparativa altura láminas de agua para las diferentes soluciones	69

Índice de tablas

Tabla 1: Áreas de las subcuencas	33
Tabla 2: Usos del suelo por subcuenca	35
Tabla 3: Umbrales de escorrentía a emplear	36
Tabla 4: Coeficientes de escorrentía de cada cuenca.....	37
Tabla 5: Número de curva CNII para cada cuenca.....	37
Tabla 6: Longitud y pendientes de las cuencas	39
Tabla 7: Tiempos de concentración.....	39
Tabla 8: Parámetros para el modelo de Linsley	41
Tabla 9: Caudales máximos para cada periodo de retorno	50
Tabla 10 Ejemplo de secciones sin encauzar.....	61
Tabla 11 Ejemplo de secciones encauzadas.....	61
Tabla 12 Comparativa sección encauzamientos totales y parciales ..	65
Tabla 13: Niveles de la lámina de agua para T500	71
Tabla 14 Precio de las principales unidades de obra a considerar	72
Tabla 15 Precio de la estabilización del cauce	72
Tabla 16 Precio de la solución cajón.....	73
Tabla 17 Precio de la solución con muros laterales	73
Tabla 18 Precio de los muros de la solución con laguna.....	73
Tabla 19 Precio de la solución con laguna de inundación	74
Tabla 20 Comparativa de alternativas	75

1. Introducción

Las ciudades de Centro América y América del sur abarcan cerca del 75% de la población del continente. Concretamente la región de Santiago de los Caballeros tiene una distribución del 76% urbana frente al 24% rural (Tatuc *et al.*, 2014).

Por otro lado, el crecimiento demográfico experimentado por estas ciudades es muy significativo con pirámides de población muy jóvenes lo que asegura el crecimiento futuro siguiendo la tendencia actual.

Fruto del crecimiento demográfico surge un aumento del desarrollo urbano de la metrópoli, pasando la ciudad de Santiago de los 9Km² en 1960 a los más de 90Km² del año 2009 (Demuca, 2009)

Este crecimiento urbano desmesurado en los últimos 50 años ha provocado en muchos casos un desarrollo urbano de la ciudad poco planificado; lo que ha causado problemas importantes a la población de la ciudad, especialmente a aquellos sectores en mayor riesgo social. Esta parte de la población tiende a ocupar las zonas con menos recursos, como pueden ser las zonas de inundación natural del cauce de los ríos. Estas zonas se caracterizan además por poseer unas pésimas redes de saneamiento y drenaje haciendo más que probable el riesgo de inundación ante un desbordamiento del cauce natural de las aguas fluviales.

Por todo ello el Banco Interamericano de desarrollo ha fijado dentro de sus objetivos de estudio el caso de la ciudad de Santiago de los Caballeros en el que se centrará el presente trabajo de fin de Grado [Figura 1].

MEXICO
 2012
 ● La Paz
 2013
 ● Campeche
 ● Xalapa
 2016
 ○ Hermosillo
 ○ Lázaro Cárdenas
 ○ Tapachula
 2017
 ○ Chetumal
 ○ Coatzacoalcos
 ○ Salina Cruz
 ○ Toluca

GUATEMALA
 2013
 ● Quetzaltenango/Xela

EL SALVADOR
 2011
 ● Santa Ana

HONDURAS
 2014
 ● Tegucigalpa

NICARAGUA
 2012
 ● Managua

PANAMA
 2015
 ● Ciudad de Panamá

COLOMBIA
 2012
 ● Barranquilla
 ● Bucaramanga
 ● Manizales
 ● Pereira
 2013
 ● Montería
 ● Pasto
 2014
 ○ Cartagena
 ○ Valledupar
 2015
 ○ Armenia
 ○ Santa Marta
 ○ Villavicencio
 2016
 ○ Bogotá
 ○ Nieva
 ○ Popayán
 ○ Riohacha
 ○ Riosucio
 ○ Sincelejo y Corozal

ECUADOR
 2013
 ● Cuenca

PERU
 2011
 ● Tijuillo
 2014
 ○ Huancayo
 2015
 ○ Cusco

BOLIVIA
 2012
 ● Cochabamba

CHILE
 2012
 ● Valdivia
 2015
 ○ La Serena - Coquimbo
 ● P. Mont. Puerto Varas

ARGENTINA
 2012
 ● Mar del Plata
 ● Salta
 2013
 ● Paraná
 2014
 ● Alféreo
 ● Las Hóras
 2015
 ○ Goya
 2016
 ○ Allan
 ○ Gran Bahía Blanca
 ● Bahía Blanca
 ● Pehuayán
 ○ Gran Jujuy
 ● Pehuayán
 ● San Salvador de Jujuy
 ● Tucumán
 ○ Gran La Plata
 ● Buenos Aires
 ● Córdoba
 ● Rosario
 ○ Gran Mendoza
 ● Mendoza
 ● San Juan
 ● San Luis
 ● San Martín
 ● San Rafael
 ● San Salvador de Jujuy
 ● Tucumán
 ● Ushuaia
 ● Villa María
 ● Zárate
 ● Zárate-Campana
 2017
 ○ Bariloche
 ○ La Banda-Santiago del Estero
 ○ Zárate-Campana

BAHAMAS
 2015
 ○ Nassau

HAITI
 2013
 ○ North. Dev. Corridor

REP. DOMINICANA
 2014
 ● Santiago de los Caballeros

VENEZUELA
 2014
 ● Cumaná
 2017
 ○ Barcelona
 ○ El Tigre
 ○ Puerto Cabello

BARBADOS
 2014
 ○ Bridgetown

TRINIDAD Y TOBAGO
 2011
 ● Port of Spain

GUYANA
 2017
 ○ Georgetown

SURINAME
 2015
 ○ Paramaribo

BRASIL
 2011
 ● Goiânia
 2013
 ● João Pessoa
 2014
 ● Florianópolis
 ● Palmas
 ● Vitória
 2016
 ● Três Lagoas/MS

PARAGUAY
 2013
 ● Asunción

URUGUAY
 2011
 ● Montevideo

Como efectos del cambio climático y del calentamiento global, las lluvias que se producen en diversos puntos del planeta se han visto incrementadas en las últimas décadas de una manera muy pronunciada. Especialmente han crecido las precipitaciones de lluvias extremas. En concreto el número de tormentas tropicales que afectan en esta zona ha aumentado más de un 150% (Easterling *et al.*, 2005).

Además, diversos estudios predicen que la situación climática actual tiene una tendencia a seguir en la misma línea debido a los efectos del cambio climático [Figura 2].

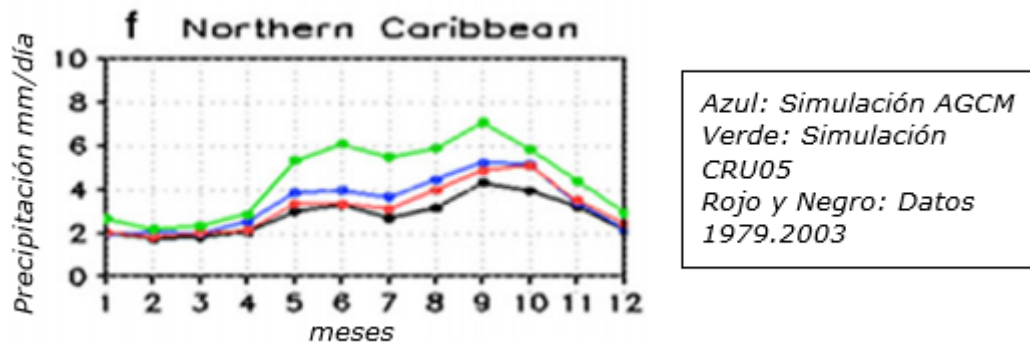


Figura 2: Previsión media lluvias diarias hasta 2099 (Hall et al., 2013)

Por otro lado, la planificación urbana existente en muchas ciudades de la República Dominicana como puede ser el área de estudio es reducida o nula. Este motivo propicia los nefastos datos en cuanto a coste económico y humano resultante de las inundaciones consecuencia de la apertura de los aliviaderos de las presas del río Yaque del Norte en el año 2007. La apertura de los aliviaderos de la presa de Tavera, consecuencia de la tormenta Olga, causó 8 muertos y numerosos desaparecidos (Iban Campo, 2007).

Como Santiago de los Caballeros fue una de las ciudades más afectadas por las inundaciones, y es un problema que podría volver a ocurrir en los próximos años, el BID decidió incluir dentro de sus actuaciones la búsqueda de soluciones para esta ciudad del norte de la República Dominicana. Entre las medidas a desarrollar propuestas por el Banco Interamericano para el Desarrollo junto con el organismo de la ONU Cepal (Samaniego and Galindo, 2010), destacan como acciones más importantes:

- Inventario de desastres Históricos

-
- Análisis de amenazas Pasadas y Futuras
 - Catálogo de infraestructuras críticas y zonas residenciales afectadas
 - Evaluación y propuesta de medidas para la reducción del riesgo con un análisis coste beneficio

Dentro de estas propuestas elaboradas por ambas instituciones podríamos encajar el presente trabajo, pues se pretende dar respuesta al cuarto postulado del anterior documento, elaborando un estudio de propuestas de mejora para la mitigación de las inundaciones provocadas por la apertura de las compuertas derivada de las grandes avenidas en la presa de Tavera en la ciudad de Santiago de los Caballeros.

2. Objetivo

Para poder llevar a cabo el objetivo fundamental del trabajo se va a realizar un análisis del problema desde dos enfoques

- Hidrológico: realizando el estudio de avenidas del régimen natural de los ríos con varios periodos de retorno para poder realizar posteriormente el cálculo hidráulico de las soluciones a adoptar.
- Hidráulico: realizando un estudio de las soluciones propuestas y su utilidad frente a las avenidas para las que serán diseñados.

Específicamente podríamos desagregar los objetivos en:

- Plantear la problemática existente y definir el área de estudio.
- Caracterizar las cuencas vertientes y los caudales de avenida mediante un estudio hidrológico.
- Examinar la situación actual.
- Definir las posibles alternativas a implementar en las zonas libres de la ciudad próximas a áreas urbanas para mitigar los efectos de los desbordamientos del río.
- Realizar el estudio hidráulico de las alternativas presentadas.
- Realizar el estudio económico básico de las propuestas.

3. Planteamiento del problema

El norte de la República Dominicana es un área en la que habitualmente se suceden periodos de fuertes lluvias durante la época de tormentas tropicales. La precipitación media acumulada durante un año se sitúa en torno a los 1000mm (Climate Data, 2018), produciéndose, en determinados periodos de tiempo, picos notables en las precipitaciones. Motivo por el cual necesitan realizar los desagües de la presa, en ocasiones sin demasiado tiempo para avisar a la población. Es por ello por lo que resulta necesaria la búsqueda de soluciones a la problemática detectada.

3.1. Descripción de la zona de estudio

Santiago de los Caballeros es una ciudad ubicada en la zona norte de la República Dominicana. Esta urbe es la segunda más poblada del país con 550.000 habitantes, e incluso superando el millón si se considera todo el área metropolitana (Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros, 2014).

Geográficamente, Santiago de los Caballeros está situada hacia el norte del centro del país [Figura 3]. Cuenta con la comunicación por carretera más importante de la República Dominicana que lo comunica con la capital (ubicada más al sur). Forma parte de la región del Cibao, limitada al este con las provincias de la Vega y Espaillat, al sur con la provincia de San Juan de la Maguana, al norte con la provincia de Puerto Plata y al oeste con las provincias de Valverde y Santiago Rodríguez. La ciudad de Santiago está situada en la Región del Cibao, subregión del Cibao Central de la República Dominicana, en la divisoria de Azua, del Valle del Yaque del Norte y el Valle del Yuna, cuencas sobre las que centraremos este estudio.

En cuanto a la extensión, la superficie de la provincia es de 2,839 km², de los cuales el municipio ocupa 612 km² aproximadamente. La superficie del área metropolitana de la ciudad de Santiago de los Caballeros es de 90 km².

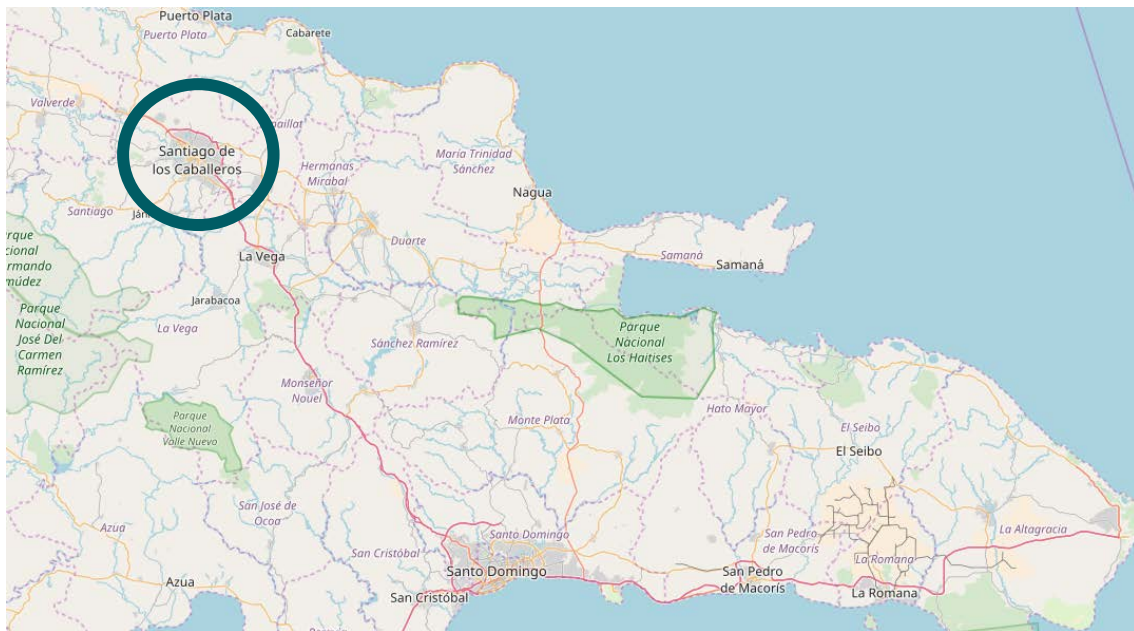
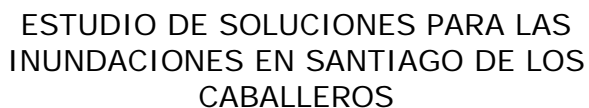


Figura 3: Ubicación de Santiago de los Caballeros en la República Dominicana (Fuente OSM¹)

La ciudad cuenta con un potencial de crecimiento muy importante, lo que hace que fuera incluida en el año 2014 en el programa de Ciudades Emergentes Sostenibles [Figura 4].

¹ OSM: Open Street Maps es una plataforma de creación y compartición de mapas libremente bajo licencia Creative Commons 3.0



3.2. Clima de la zona de estudio

En este apartado se va a realizar un estudio más exhaustivo del clima característico de la región de Cibao y de la ciudad de Santiago de los Caballeros concretamente, como contextualización del problema que suponen las fuertes tormentas tropicales que pueden suceder en la temporada de huracanes.

3.2.1. Precipitaciones

Analizando la pluviometría de la zona se descubre que la región tiene de media unos 9 meses de temporada de lluvias, con un 17% de probabilidad de ocurrencia; mientras que durante los otros 3 meses ésta cae por debajo del 10%. Podemos establecer noviembre y mayo como meses más lluviosos (Weatherspark, 2016). A continuación [Figura 5], se muestra una gráfica elaborada con datos de la agencia dominicana del clima donde se centra la lluvia caída en un periodo de 31 días en torno al día mostrado y las bandas al 25-75% y 10-90% de confianza. Los datos son una media desde 1980 a 2016 por lo que los fuertes picos de las tormentas de 2007 y 2015 quedan ocultos.

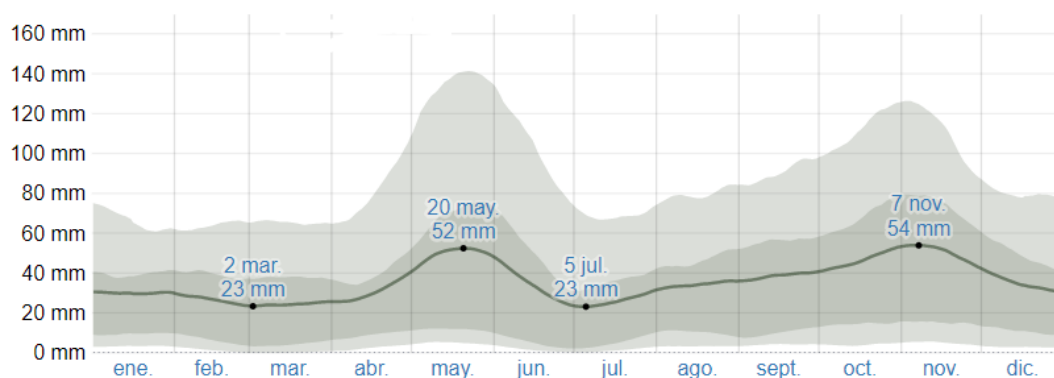


Figura 5: Precipitaciones acumuladas en un entorno de 31 días y bandas de confianza 25-75% y 10-90% (Fuente weatherspark.com)

Como consecuencia se puede extraer que las precipitaciones son bastante regulares. Sin embargo, teniendo en cuenta los valores más altos dentro de los máximos del 90% encontramos el problema que durante las precipitaciones de 2007 obligó a la apertura de los aliviaderos de la presa causando la problemática que se analizará en este trabajo.

3.2.2. Curvas IDF

Estudiadas las precipitaciones de la zona se pueden sacar las curvas IDF necesarias para el posterior cálculo de los hidrogramas, para su extracción se emplea la información facilitada por IH Cantabria para el presente estudio [Figura 6]. En su estudio sobre la zona, IH Cantabria indica que la procedencia de los datos proviene de la estación pluviométrica de la red TRMM situada junto a Santiago de los Caballeros.

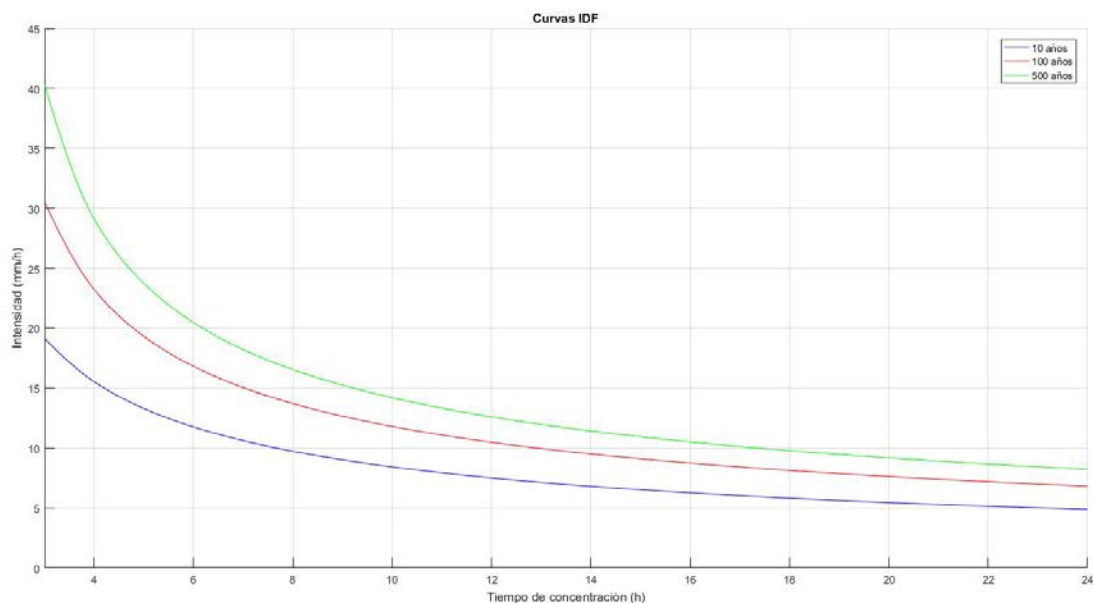


Figura 6: Curvas IDF (Fuente datos: IHCantabria)

Como se puede ver en la Figura 6, los datos de partida para las curvas IDF generadas (TRMM NASA, 2018), tienen un tiempo de concentración mínimo de 3 horas. Es por ello que se precisa en la generación de Tc inferiores a esas 3 horas un ajuste de la curva.

3.3. Inundaciones

Las inundaciones que anualmente afectan a la zona están claramente localizadas dentro de la temporada de tormentas. El hecho de que estas inundaciones sean tan previsibles ofrece la ventaja de que permite planificar previamente las actuaciones. Sin embargo, debido a los problemas ya mencionados hasta el momento, esto no ha sido suficiente para que la ciudad no sufra las graves consecuencias derivadas de ellas.

Según indica Handmer, el riesgo para la población humana es muy grande en caso de inundación, por lo que resulta fundamental tomar decisiones previas para evitar tener que lamentar posteriormente afectados (Handmer and Monson, 2004). Justificándose así una vez más la necesidad de generar elementos de defensa como propone este estudio.

Así mismo, cabe destacar que dentro de la República Dominicana, cerca del 46% de las inundaciones registradas en el periodo 1966-2000 se concentraron en zonas urbanas importantes tales como el Distrito Nacional y varias ciudades de la subregión del Cibao Central (Puerto Plata, Santiago de los Caballeros, Concepción de la Vega, Bonao y Boca) y del Cibao Oriental (Cotui, Nagua y San Francisco de Macorís) (Gómez De Travesedo, Saenz Ramírez and Ejecutivo, 2009).

3.3.1.1. Antecedentes de inundaciones

Durante los últimos 11 años se han producido en la región de Cibao, especialmente en la ciudad de Santiago, numerosos casos de

inundaciones, las cuales han afectado especialmente a la población de los barrios anteriormente descritos.

Cabe destacar las producidas en la madrugada del 12 de diciembre del 2007, cuando como consecuencia del desagüe de la presa de Tavera, se produjo una de las mayores inundaciones sufridas por las comunidades de Santiago de los Caballeros, Mao y Montecristi cuando la tormenta Olga produjo 51 millones de metros cúbicos de agua en la cuenca del río Yaque del Norte, con precipitaciones aproximadas de 340 milímetros, lo que representó la tercera parte de agua que cae cada año en esa cuenca. Los daños ocasionados por ese desagüe se calcularon en más de 33 personas muertas, más de 60 mil desplazados, 321 viviendas afectadas, 23 acueductos fuera de servicio, pérdidas por 221 millones de dólares en el sistema eléctrico, 18 puentes derribados, la cárcel de Rafey con daños por valor de 112 millones de dólares dominicanos (2,02 millones de €) y daños millonarios a la agricultura (Tejada, 2016). El coste final de recuperación se calculó en 1.967 millones de dólares dominicanos (34 millones de €). En aquella ocasión, el desagüe se inició a las 11 de la noche del 11 de diciembre del 2007, cuando el nivel de la presa alcanzó 327.65 metros, 15 metros más que el nivel máximo [Figura 12].

Al cabo de los años, en las dos últimas semanas del mes de octubre del año 2016, y durante el mes de noviembre, se produjeron, de nuevo, grandes periodos de lluvias. Técnicos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRIHI) en la tarde del 8 de noviembre [Figura 8], comenzaron a abrir los aliviaderos de la presa de Tavera al superar los 324 metros cúbicos por segundo, por la gran cantidad de lluvias en esta zona. Un segundo desagüe se produjo por la crecida del río Jimenoa, que obligó a poner en funcionamiento la otra turbina de la presa, dado que le llegaban a la presa más de 400 m³/s.

Finalmente, se produjo una tercera apertura de compuertas en esa temporada de lluvias, ocurrió la noche del 27 de noviembre del año

2016, el embalse tuvo una entrada histórica de volúmenes de agua, al alcanzar $922 \text{ m}^3/\text{s}$, desaguando $300 \text{ m}^3/\text{s}$.



*Figura 7: Apertura de compuertas en la presa de Tavera por las inundaciones de 2007
(Fuente: tenarenses.com)*



Figura 8: Inundaciones de 2016 (Fuente: BID)

3.3.1.2. Riesgo de inundación: definición.

Según (Gómez De Travesedo, Saenz Ramírez and Ejecutivo, 2009) la región de Santiago de los Caballeros es una de las que tiene más

- La vulnerabilidad, que dependerá de las características humanas, ambientales y socioeconómicas del lugar, así como de las infraestructuras con las que cuente.

Combinando los tres factores anteriores se obtiene el riesgo [Figura 10].

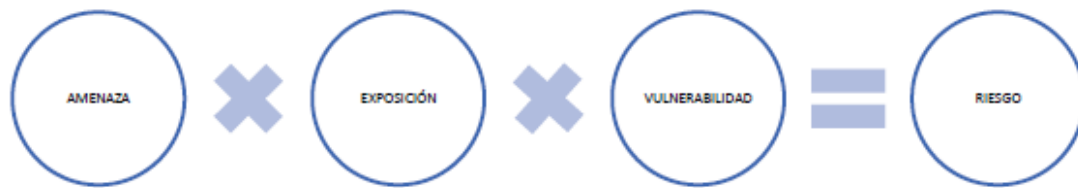


Figura 10: Diagrama explicativo del riesgo (Fuente: (Gómez Coma, 2018))

A continuación, se expone detalladamente cada uno de los factores que producen el riesgo detectado:

- Amenaza: se conoce como amenaza al factor externo que puede causar un riesgo y, por tanto, notables daños socioeconómicos en las regiones a las que afecta (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)., 2010). La ciudad está cíclicamente amenazada por las lluvias torrenciales, así como por las tormentas tropicales características del Caribe [Apartado 3.3] (Climate Data, 2018).
- Exposición: hace referencia a las personas o a los bienes (viviendas particulares, infraestructuras, etc.) que pueden verse afectados por una amenaza. La exposición en Santiago de los Caballeros ha sido acrecentada por el fenómeno migratorio que ha hecho que la ciudad crezca sin seguir un plan establecido, y por la eliminación de las barreras naturales de defensa frente a las inundaciones (Demuca, 2009).

- Vulnerabilidad: indica lo susceptible que es la comunidad a las amenazas ambientales y depende del uso del suelo, de la calidad de las viviendas, de las infraestructuras del país, de la deforestación, de la destrucción de cuencas, etc. Santiago de los Caballeros es una zona ciertamente vulnerable y esto se debe fundamentalmente a la precariedad de sus infraestructuras, al desorden urbanístico y a la ocupación del espacio fluvial (Demuca, 2009).

3.4. Cuenca del Río Yaque del Norte

Nuestro problema fundamental se centra en la ciudad de Santiago de los Caballeros, que está ubicada aguas arriba del cauce del río, prácticamente donde se juntan los dos ríos que se unen junto a las presas de Tavera y de Bao para dar lugar al cauce principal.

Como se ha indicado el estudio se va a realizar sobre la cuenca del río Yaque del Norte. Este constituye el río más importante de toda la República Dominicana recorriendo 296km y, siendo su cuenca con cerca de 7000km² (Acosta Guzmán, 2015), la más importante del país. La cuenca está situada en la zona norte de la isla de La Española [Figura 11], partiendo de la Cordillera Central y acabando su recorrido en la bahía de Montecristi en las aguas del océano Atlántico.

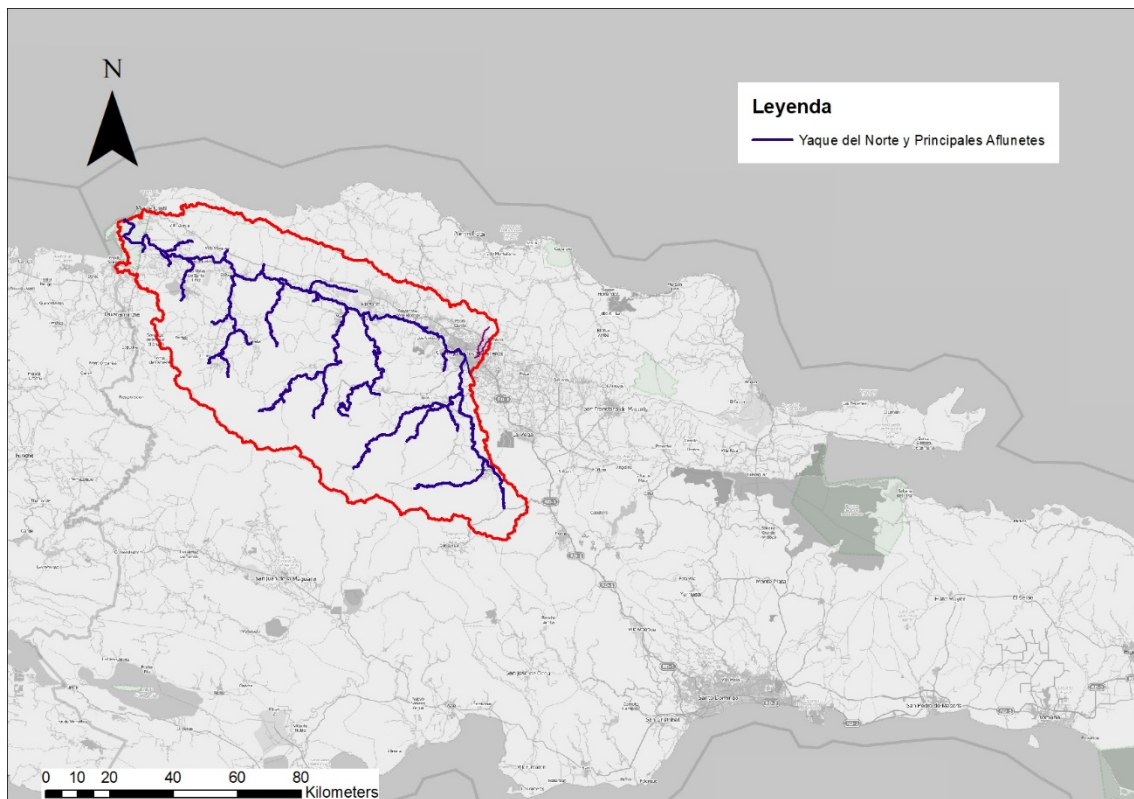


Figura 11: Ubicación de la cuenca del río Yaque del Norte con el cauce y los principales afluentes (Fuente: elaboración propia mapa: OSM)

El río sirve de abastecimiento a numerosas ciudades del país entre las que destacan la propia Santiago, Jarabacoa o Mao. Debido a su extensa longitud, la cuenca principal está compuesta por numerosas subcuencas [Figura 12] que vierten las aguas en el cauce del Yaque del Norte, cuyo caudal medio es aproximadamente $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

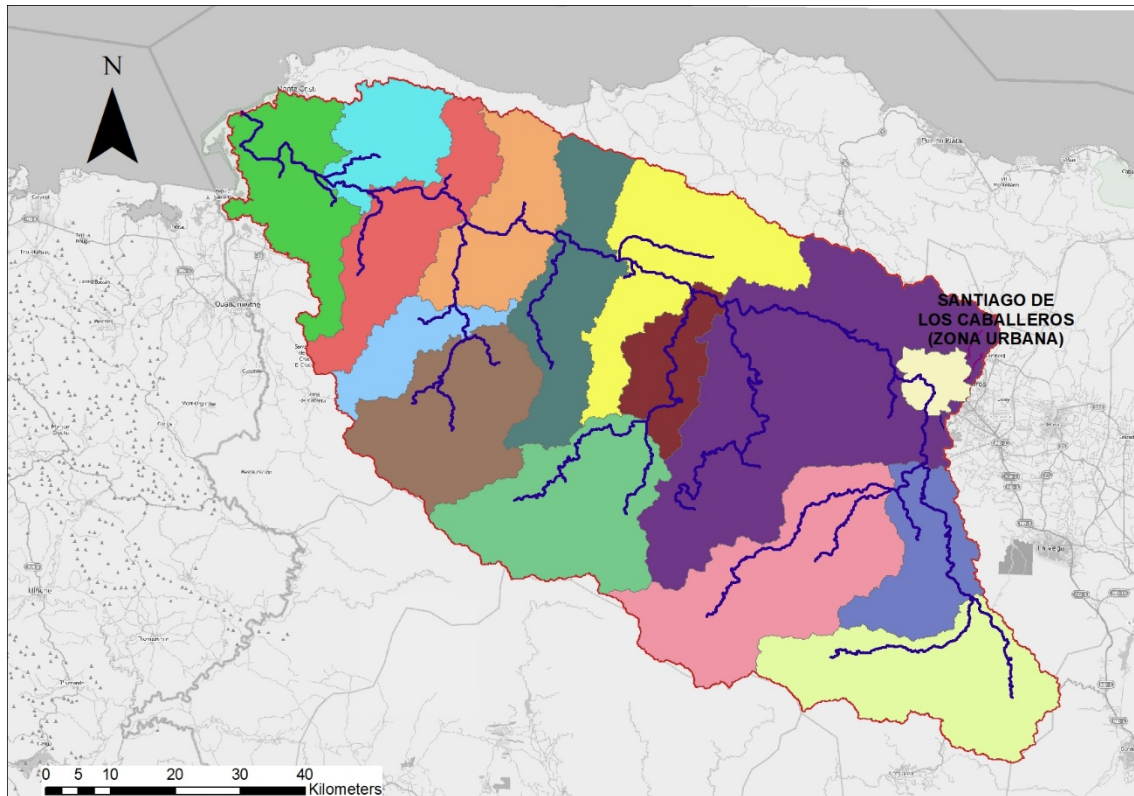


Figura 12: Subcuencas que forman parte de la cuenca principal del río Yaque (Fuente: elaboración propia mapa: OSM)

Además de considerar la cuenca vertiente resultante de la unión del Alto Yaque y del Bao, de cara a dimensionar las medidas de mitigación de inundaciones, se van a tener en cuenta 3 pequeñas cuencas que vierten sus aguas en la ciudad. Las de los arroyos Guazumal y Hondo y la del río Gurabao. En la [Figura 13], pueden verse las cuencas principales de la zona de estudio.

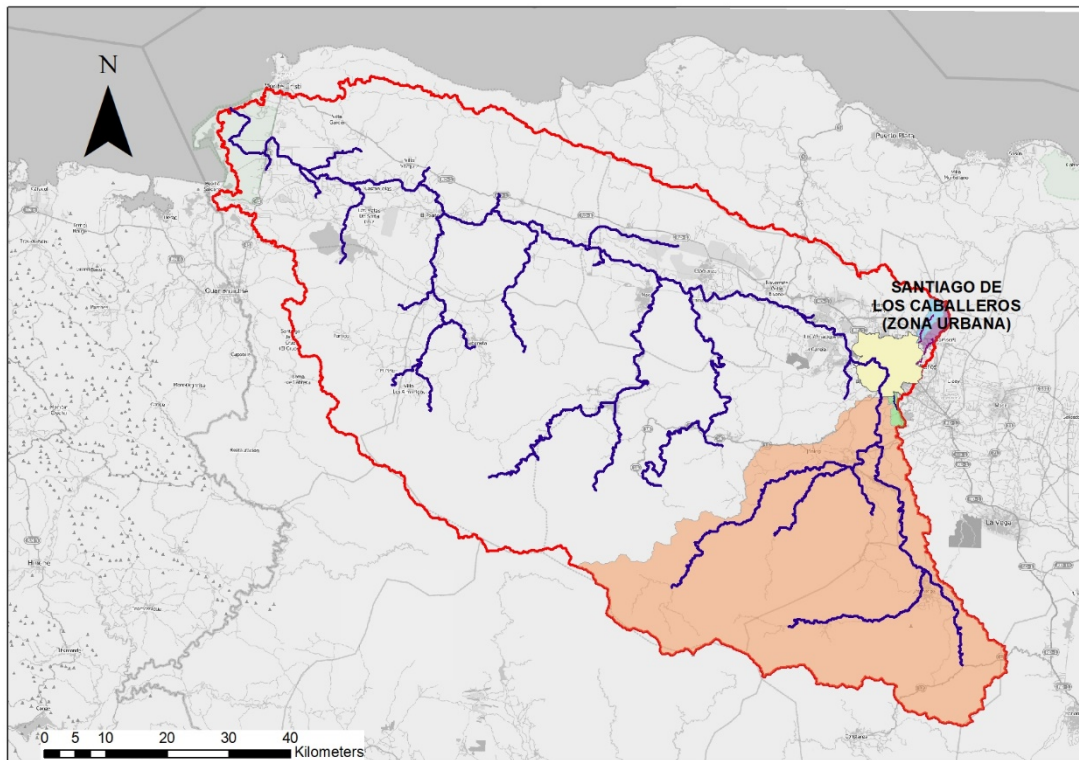


Figura 13: Área de estudio (Fuente: Elaboración propia, mapa: OSM)

3.4.1. Usos del suelo

El conjunto de la cuenca objeto de estudio está formado por diferentes tipos de suelo cuyos tipos de acuerdo con la información extraída del mapa de los usos del suelo desarrollado por European Space Agency (ESA) bajo el proyecto GlobCover en el año 2009 [Figura 14].

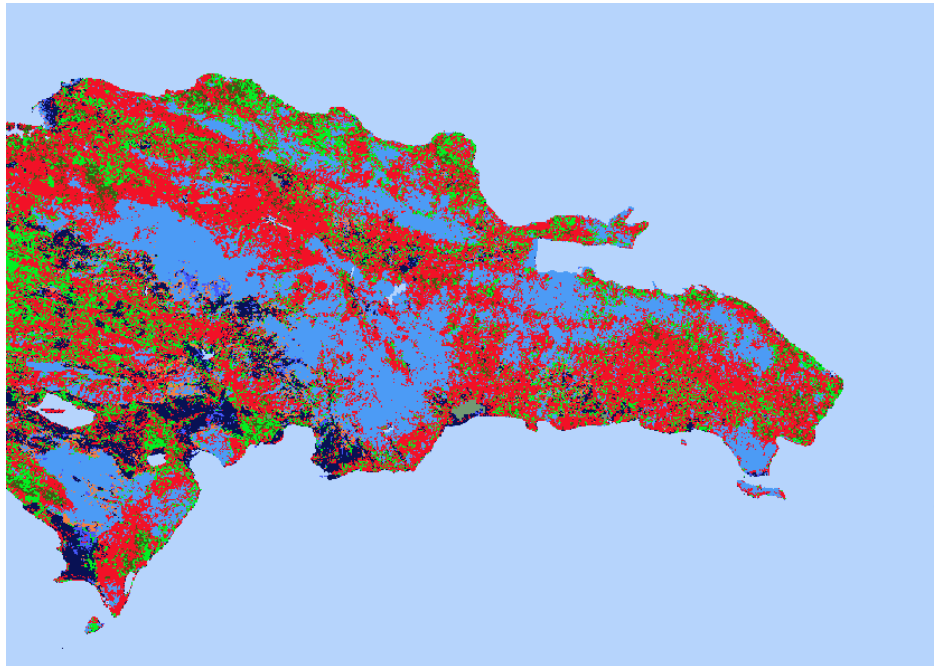


Figura 14: Mapa de los usos del suelo en la República Dominicana (Fuente: GlobCover, 2009)

3.5. La Presa de Tavera y de Bao

Aunque en este estudio no se va a analizar explícitamente el aliviadero de la presa de Tavera, ni de Bao, sino su cuenca natural, se van a describir a continuación las características de las presas.

El embalse de Tavera tiene capacidad para 170 millones de metros cúbicos de agua. El conjunto Tavera-Bao constituido por dos presas y el canal de comunicación a cielo abierto [Figura 15], tiene una capacidad total de 417 millones de m³ de agua. Asimismo, están unidas mediante un túnel de 4.70 km a la central de Sabana Iglesia de 98 megavatios, además son usadas para:

- El regadío
- El aprovechamiento hidroeléctrico
- Suministro de agua



Figura 15: Canal que une las presas de Tavera y Bao (Fuente: Wikimedia)

La presa de Tavera fue la primera en su género en la República Dominicana. Después de represar las aguas al río Yaque del Norte, es la principal fuente de abastecimiento de agua para la producción agrícola de la zona, a través de dos canales de riego.

El estudio y diseño de la presa de Tavera fueron iniciados en 1966 por la firma alemana Lahmeyer International, que también estuvo a cargo de la supervisión en todo el proceso constructivo. La inauguración final se produjo en el año 1973

En cuanto al muro de contención, mide unos 77 metros de altura. Forma un lago de 150 millones de m^3 de agua y 7 km de longitud, tiene seis compuertas de desagüe con capacidad para aliviar hasta 1.000 m^3/s [Figura 16], más un vertedero de emergencia con una capacidad de vertido de 7.000 m^3/s y otro vertedero de servicio para desaguar 3.000 m^3/s . Es decir, dichos vertederos pueden llegar a aliviar 10.000 m^3/s (Tejada, 2016).



Figura 16: Aliviadero de la presa de Tavera (Fuente: El Nuevo Diario)

3.6. Asentamientos urbanos.

Como se ha expresado anteriormente, el objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado es la búsqueda de soluciones para evitar la inundación de los asentamientos existentes junto a los márgenes del río en la ciudad de Santiago.

Estos asentamientos están establecidos sobre las márgenes del río Yaque del Norte y no disponen de ningún tipo de saneamiento o drenaje adecuado fruto de su establecimiento sin planificación. Además, se ubican sobre suelos de características arcillosas y arenosas

Estas construcciones realizadas junto al río despojan a la población que allí vive de los servicios ecosistémicos que brinda la vegetación ribereña, tales como la regulación del flujo y dinámica del río, la prevención de erosión, el amortiguamiento de la fuerza del viento y la filtración de sedimentos, los cuales reducen el riesgo de deslizamientos e inundaciones. Por su parte, la carencia de servicios urbanos en los asentamientos irregulares y la contaminación de los ríos son

fenómenos que exponen a estas comunidades a brotes epidémicos y dificultan su recuperación del desastre.

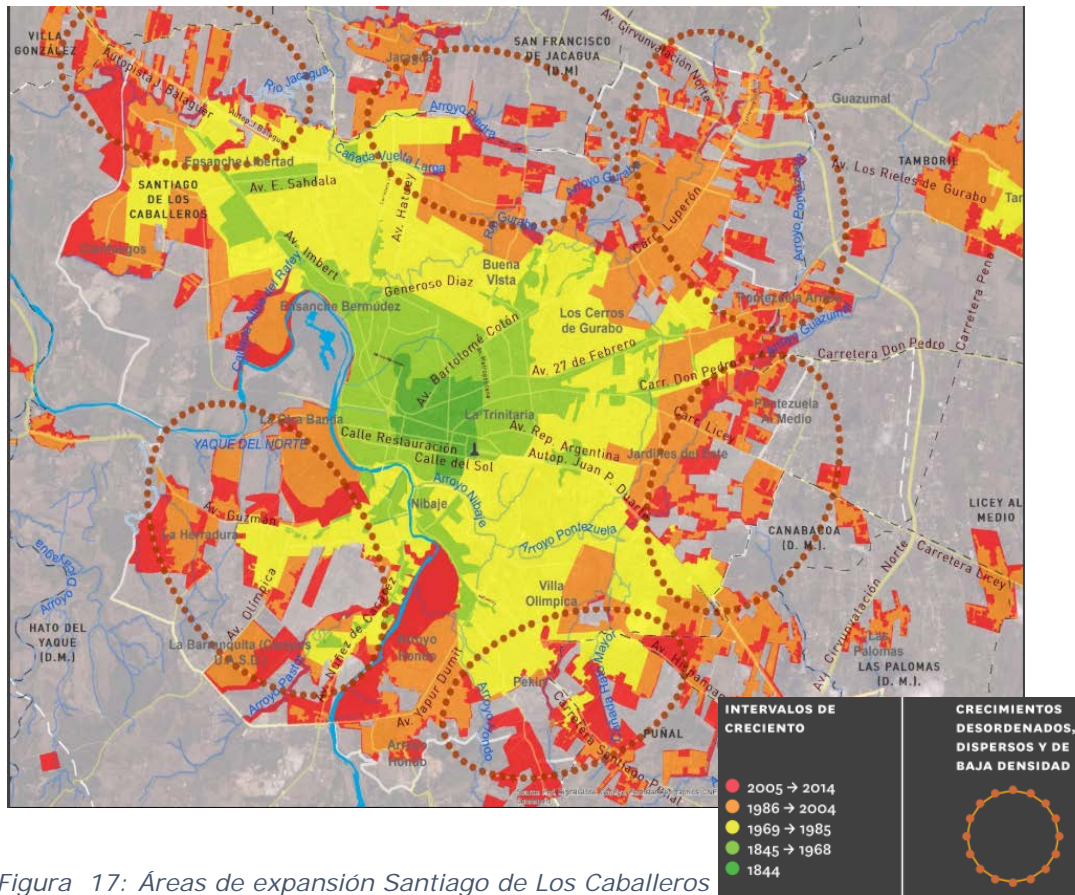


Figura 17: Áreas de expansión Santiago de Los Caballeros
(Santiago de los Caballeros)

Tal y como puede verse en la [Figura 17], son las áreas junto al río las que mayor crecimiento han experimentado durante los últimos años. Asimismo, estas zonas han experimentado lo que el propio consistorio considera un crecimiento desorganizado, disperso y de baja calidad.

El agravamiento del deterioro progresivo de su cuenca hidrográfica es debido a que los ríos han alcanzado niveles de degradación por falta de una adecuada gestión y por la deforestación.

4. Metodología

En este cuarto apartado se va a desarrollar la metodología empleada para el cálculo de las soluciones a desarrollar [Figura 18].

Como el objetivo final es la construcción de medidas de mitigación de avenidas, hay que contemplar diversos periodos de retorno dentro de este estudio. Para ello se va a plantear un estudio a 10 años como medida de partida, 100 años como periodo de retorno de cálculo definitivo y 500 para evaluar la diferencia entre asegurar ante una avenida mayor en casos donde el riesgo generado con las medidas sea elevado.



Figura 18: Metodología general

Calcular estructuras para grandes periodos de retorno conlleva un gasto claramente superior, pero a su vez una mayor seguridad de la infraestructura. El objetivo del trabajo es la búsqueda de soluciones para situaciones poco frecuentes, es por ello por lo que el periodo de retorno a usar va a ser elevado.

4.1. Estudio hidrológico

4.1.1. Procedimiento.

En primer lugar, se ha realizado un estudio hidrológico en régimen natural del cauce (sin considerar posibles alivios de las presas) pues se plantea como hipótesis su capacidad de gestión y regulación de avenidas.

El objetivo del estudio hidrológico es el de llegar a unos hidrogramas de avenida para determinados periodos de retorno.

Para llegar a los hidrogramas que se calculan con el modelo HEC-HMS, es necesario dotar a este software de unos hietogramas de partida, así como de unas condiciones de la cuenca.

En el apartado de resultados se van a describir de manera más exhaustiva los pasos seguidos, que se encuentran resumidos en la Figura 19. Todos estos pasos se aplican para construir los hietogramas mediante el método de bloques alternos.

Con los hietogramas, los tiempos de concentración y demás datos de partida se aplica el modelo HEC-HMS que devuelve los hidrogramas necesarios.

En los siguientes apartados se describe el software del modelo, así como el software gis empleado en la obtención de los datos de las cuencas.

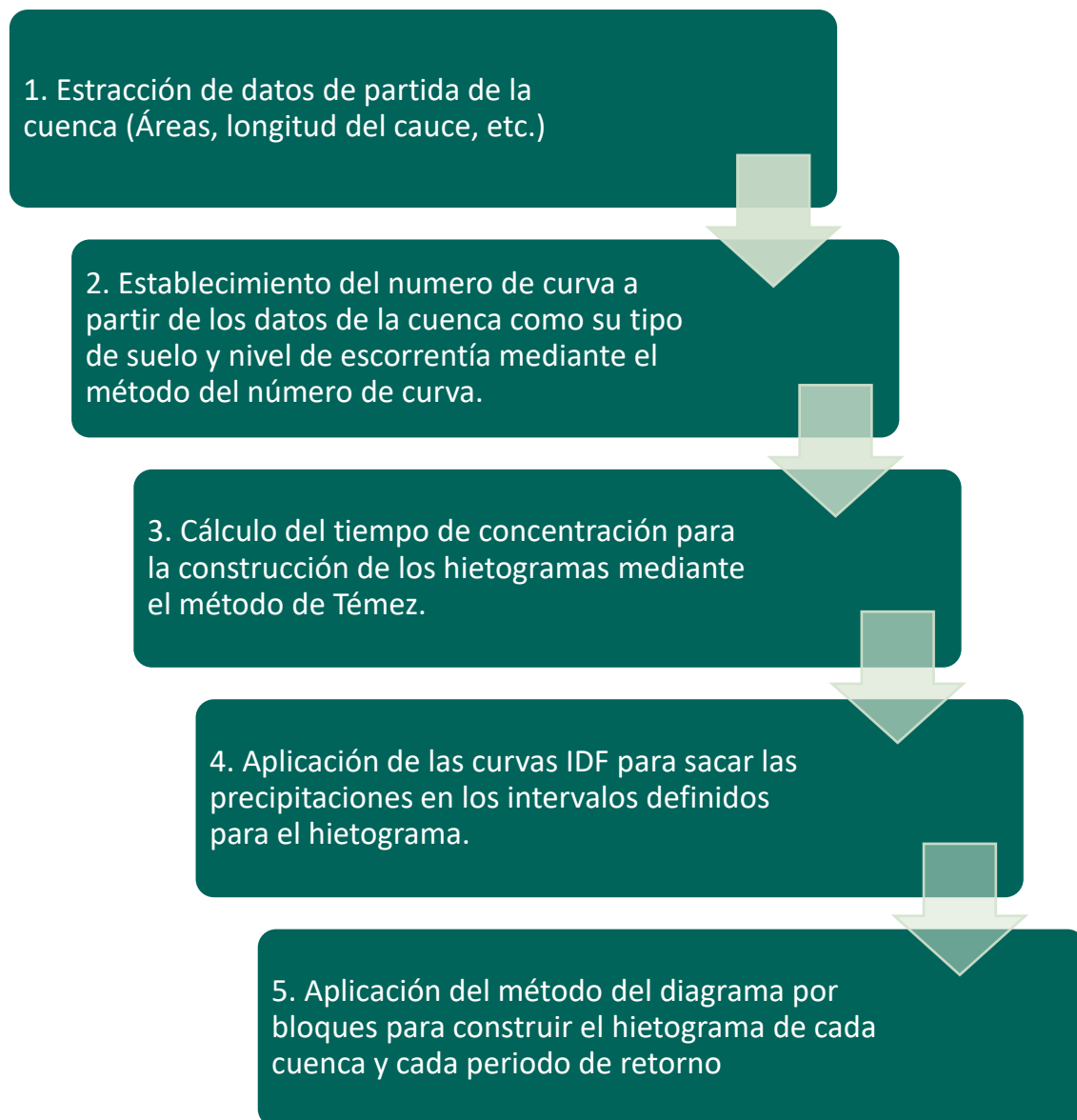


Figura 19: Proceso para realizar el estudio hidrológico.

4.1.2. Software.

Para la realización del estudio hidrológico de este trabajo se han empleado como soporte dos softwares líderes en el mercado: ArcGIS y HEC- HMS. El sistema de visualización geográfica que representa la herramienta de ESRI ArcGIS ha permitido definir la cuenca de estudio junto a su área, subcuencas de las que consta, definición del cauce principal, longitud y pendiente del mismo, etc. Con el segundo se han

obtenido los hidrogramas de avenida que posteriormente servirán como punto de partida del estudio hidráulico.

A continuación, se resumen de forma breve las características de ambos modelos.

4.1.2.1. ArcGis

Las herramientas de modelado hidrológico en la caja de herramientas de la Extensión ArcGIS Spatial Analyst proporcionan métodos para describir los componentes físicos de una superficie. Las herramientas hidrológicas permiten identificar sumideros, determinar la dirección de flujo, calcular la acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de corrientes (ESRI, 2018).

Para trabajar con dicho software ha sido necesario emplear un modelo digital del terreno objeto de estudio, facilitado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

4.1.2.2. Hec-Hms

El modelo HEC-HMS, de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-1, con varias mejoras con respecto a éste (CEDEX, 2014).

El modelo HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea un flujo de simulación, combinando los modelos y las especificaciones introducidas.

Los resultados de la simulación se pueden ver en el mapa de la cuenca. Además, se generan tablas resumen globales y de elementos concretos de la cuenca, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total desaguado (Carmona, 2015).

El modelo contiene:

- Descripción física de la cuenca
- Descripción meteorológica
- Simulación hidrológica
- Estimación de parámetros
- Análisis de simulaciones
- Conexión con SIG

Las fases de trabajo del programa son:

- Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escorrentía directa.
- Cálculo de la escorrentía directa producida por esa lluvia neta.
- Suma de la escorrentía directa y base, si existía previamente.
- Cálculo de la evolución de la escorrentía base a lo largo del tiempo.
- Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

El software HEC-HMS permite establecer varias subcuencas, en las cuales realiza los cálculos de las 3 primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

Permite el trabajo en todo tipo de cuencas ya sean naturales o artificiales.

4.2. Estudio Hidráulico

4.2.1. Proceso

En esta fase del trabajo se ha empleado el modelo desarrollado por la Armada Americana HEC-RAS (Brunner and CEIWR-HEC, 2016).

El modelo toma como datos de partida la geometría del cauce del río y los caudales generados en los hidrogramas de avenida del estudio hidráulico. Con estos datos se calculan las inundaciones, así como calados críticos, niveles de agua, etc. para los periodos de retorno requeridos. Siguiendo el esquema marcado en la [Figura 20], se han ido siguiendo los pasos para llegar a la solución final planteada en las conclusiones. Para ello se ha aplicado el modelo HEC-RAS que se detallará más adelante en el siguiente epígrafe para conocer diversos parámetros como las posibilidades de inundación para cada uno de los periodos de retorno, la altura de la lámina de agua para conocer el nivel de riesgo. El volumen de materiales necesarios para realizar los estudios económicos previos al proyecto final etc.

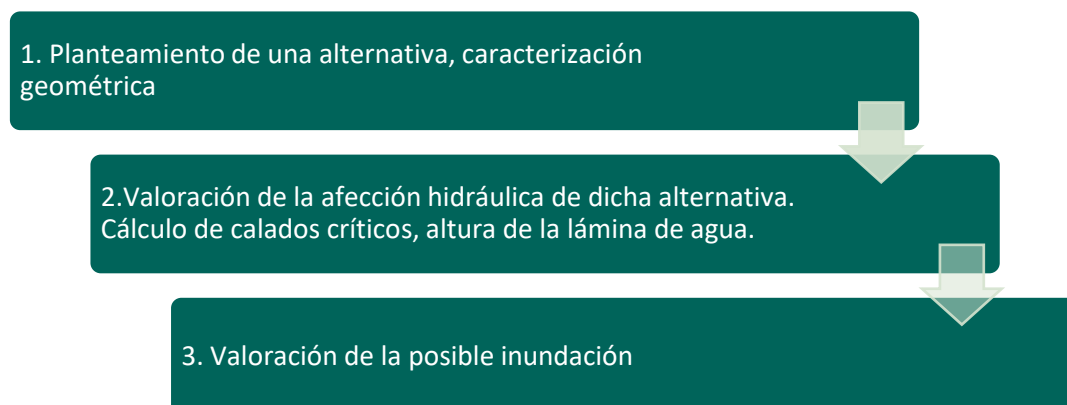


Figura 20: Proceso para realizar el estudio hidráulico.

4.2.2. Modelo empleado.

El modelo HEC-RAS, es de dominio público y está desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. Surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado en el pasado HEC-2, introduciendo varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

Como se menciona es preciso hacer un trabajo previo de los datos con una extensión de Arc-Gis conocida como HEC-GeoRAS la cual permite obtener los parámetros geométricos que son entrada del modelo HEC-RAS.

Las funciones principales del software son

- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de aguas

Nos permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables.

En el caso particular del presente trabajo se va a usar para realizar un estudio de inundabilidad de la zona de estudio en Santiago.

5. Resultados

5.1. Estudio Hidrológico

Siguiendo la metodología expuesta en los apartados 4.1 y los subapartados 4.1.2.1, y 4.1.2.2 se van a exponer los resultados obtenidos primero para la obtención de datos que requiere el modelo HEC-HMS y posteriormente para la solución de la aplicación de dicho modelo.

5.1.1. Definición de la cuenca

Partiendo del modelo digital del terreno a escala 30m facilitado por IH Cantabria, se ha procedido a la definición de las cuencas que vierten en la ciudad de Santiago. Para establecer las cuencas, es necesario conocer las áreas de inundabilidad [Figura 21] presentes en la zona de estudio puesto que sirven como punto de partida a los puntos de vertido de las cuencas a definir.

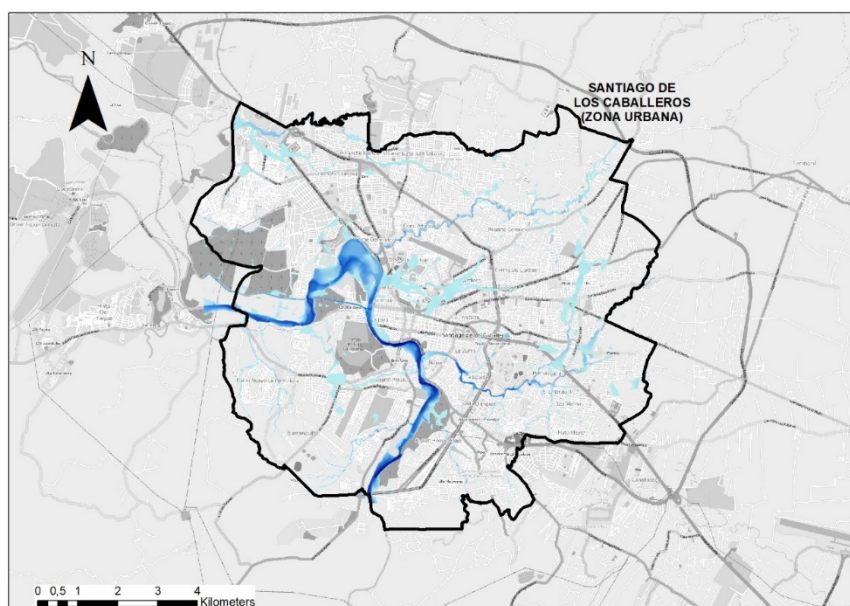


Figura 21: Áreas de inundación

A partir de un modelo digital de toda la República Dominicana, se ha definido en primer lugar la cuenca del río Yaque del Norte y todas sus subcuencas ya descritas con anterioridad en el apartado de descripción de la cuenca 3.4. [Figura 12] y [Figura 13]

Posteriormente se han juntado las cuencas que vertían en puntos próximos a la ciudad y se ha hecho un análisis más en detalle definiendo 4 cuencas afectadas que son las del Arroyo Hondo, Arroyo Guazumal, Río Gurabao y Yaque del Norte. Esta última es el resultado de la unión de los ríos Bao y Alto Yaque que confluyen en la presa de Tavera [Figura 22].

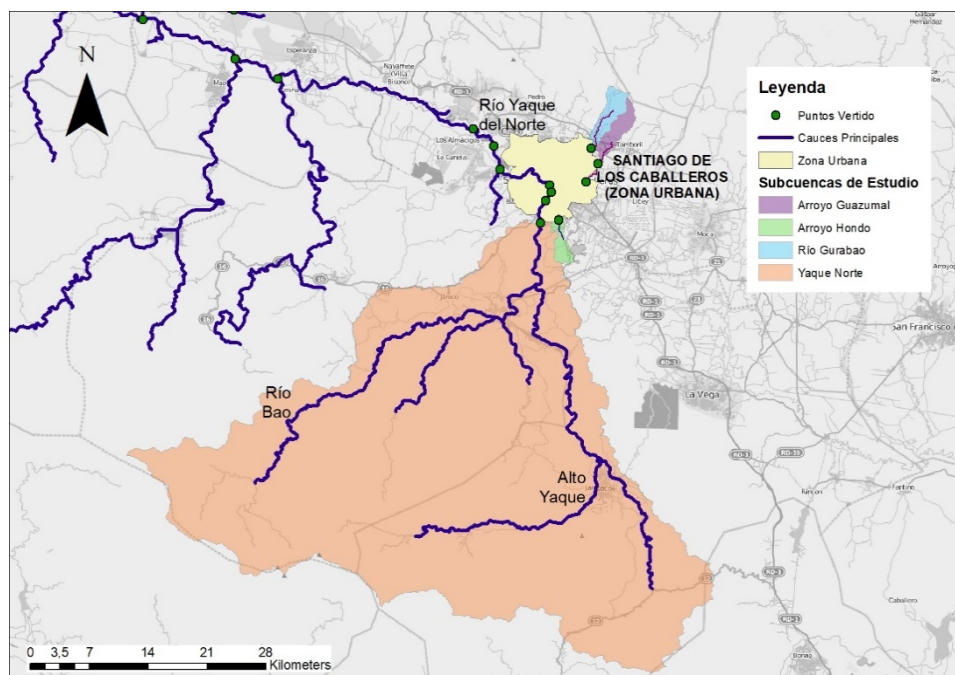


Figura 22: Subcuencas a estudiar

Como se ve resultan 4 los cauces a estudiar, cuyos puntos de vertido se han definido junto a la ciudad de Santiago.

Una vez delimitadas las cuencas es necesario conocer el área de las mismas, ya que debe ser introducido en el software con el que se va a realizar el estudio de propagación de las avenidas. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Subcuenca	Área km ²
(1) Arroyo Guazumal	12.46
(2) Río Gurabao	13.96
(3) Arroyo Hondo	8.38
(4) Bao - Yaque - Tavera	1776.89

Tabla 1: Áreas de las subcuencas

5.1.2. Número de curva

Este modelo que permite saber el número de curva para aplicar el programa de modelización HEC-HMS, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (US Soil Conservation Service) determina el umbral de escorrentía de la cuenca a través de un número de curva que depende de la capacidad de la cuenca de generar escorrentía superficial.

Sin embargo, su utilización está limitada por una serie de condicionantes (Soil Conservation Service, 1989):

- Eventos aislados
- Tormentas de 24 horas de duración como máximos
- Zonas en las que el suelo no esté congelado
- Representa las condiciones medias de la cuenca
- Escorrentía directa

Para poder aplicar el método, ha sido necesario recabar tres datos:

- Uso de suelo
- Tipo de suelo
- Umbral de escorrentía

Aplicándolo a nuestra zona de estudio los usos del suelo resultantes, que se pueden comprobar en la Figura 14, del apartado 3.4.1, se extraen los usos de nuestra zona que se muestran en la [Figura 23]. Hay que tener en cuenta que el ráster original tiene una cuadrícula de 300m de resolución y que distingue 22 tipos de usos de suelo.

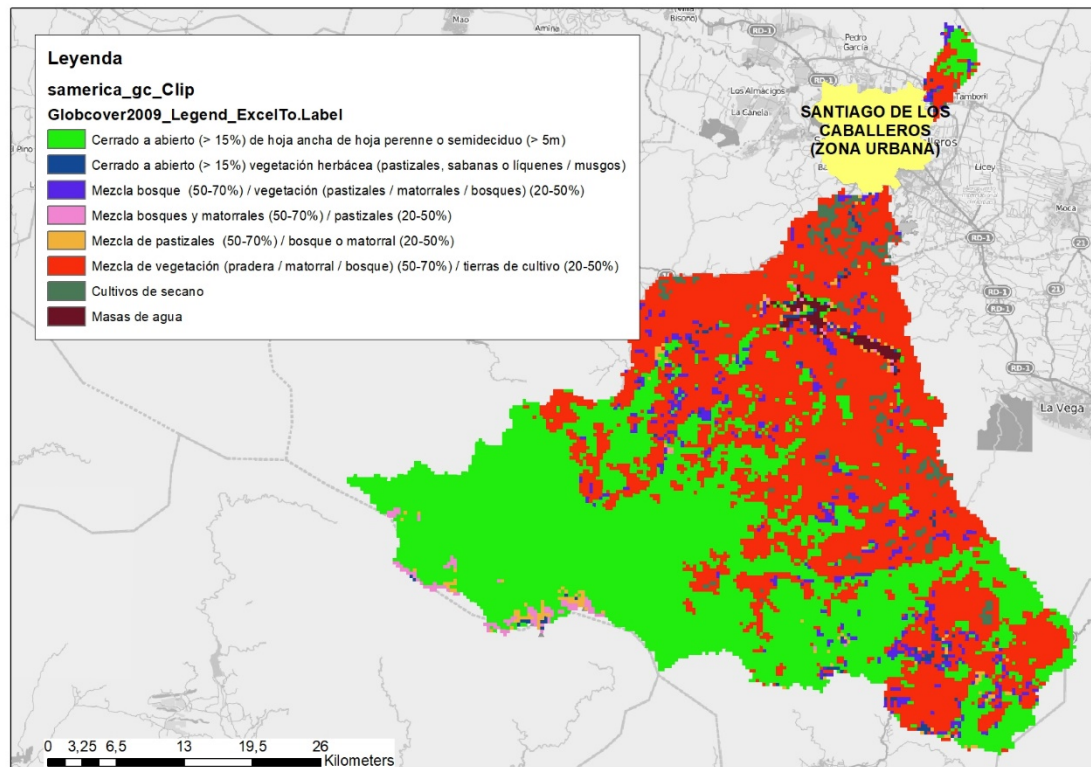


Figura 23: Usos del suelo en la zona a estudiar (GlobCover, 2009)

5.1.2.1. Tipo de suelo

Según la información facilitada por IH Cantabria el suelo en esta zona de la República Dominicana es de tipo C, es decir, de textura

franco-arcillosa, franco-arcillosa-limosa o arcillo-arenosa y, por tanto, la infiltración es lenta y el drenaje imperfecto.

Analizando nuestras cuencas resulta finalmente una distribución de tipos de suelo de la siguiente manera [Tabla 2].

Uso del suelo	Guazumal	Gurabao	Hondo	Yaque
Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (>5m)	40%	35%	0%	48%
Closed to open (>15%) herbaceous vegetation (grassland, savannas or lichens/mosses)	3%	1%	0%	1%
Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)	0%	0%	0%	1%
Mosaic grassland (50-70%) / forest or shrubland (20-50%)	0%	0%	0%	1%
Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)	13%	8%	7%	3%
Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)	44%	52%	80%	44%
Rainfed croplands	0%	4%	14%	2%
Water bodies	0%	0%	0%	1%

Tabla 2: Usos del suelo por subcuenca

5.1.2.1. Umbral de escorrentía

De cara a la determinación del umbral de escorrentía para aplicar el método del número de curva, se va a emplear la conversión propuesta por (Ferrer-Julia, Ramirez and Blanco, 2014). Los datos de Umbral de escorrentía serán por tanto los mostrados en la Tabla 3

Uso del suelo - Globcover	Uso del Suelo (Ferrer-Julia, Ramirez and Blanco, 2014)	PO (mm) a emplear
Closed to open (>15%) broadleaved evergreen or semi-deciduous forest (>5m)	Masa Forestal Espesa	31
Closed to open (>15%) herbaceous vegetation (grassland, savannas or lichens/mosses)	Pradera pendiente menor del 3	22
Mosaic forest or shrubland (50-70%) / grassland (20-50%)	Masa Forestal (31) Pradera (22)	28
Mosaic grassland (50-70%) / forest or shrubland (20-50%)	Pradera (22) Bosque (31)	26
Mosaic cropland (50-70%) / vegetation (grassland/shrubland/forest) (20-50%)	Mosaico de cultivos anuales con espacios significativos de vegetación	16
Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest) (50-70%) / cropland (20-50%)	Mosaico de cultivos anuales con espacios significativos de vegetación	16
Rainfed croplands	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano	16
Water bodies	Embalses	0

Tabla 3: Umbrales de escorrentía a emplear

Es necesario aplicar la formulación del método del número de curva donde:

$$CNII = \frac{25400}{254 + \frac{P_0}{0,2}} \quad [1]$$

Donde:

- $CNII$ es el número de curva para condiciones de humedad previa II (normal)
- P_0 es la estimación inicial del umbral de escorrentía según (Ferrer-Julia, Ramirez and Blanco, 2014)

Aplicando la ecuación [1] para cada una de las cuencas y usos del suelo de la Tabla 2 con los coeficientes de escorrentía de la Tabla 3, tenemos los resultados siguientes Tabla 4 y Tabla 5:

Cuenca	P0 (mm)
Guazumal	22
Gurabao	21
Hondo	16
Yaque	23

Tabla 4: Coeficientes de escorrentía de cada cuenca

Cuenca	CNII
Guazumal	70
Gurabao	70
Hondo	76
Yaque	69

Tabla 5: Número de curva CNII para cada cuenca

5.1.3. Tiempo de concentración

Aplicando la metodología recogida en el apartado 4.1, se ha seguido la metodología descrita en la Instrucción 5.2 I.C. de drenaje superficial, al no disponer de una propia el país de la zona de trabajo. Esta instrucción recoge la formulación de Témez para el cálculo del tiempo de concentración de la cuenca.

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{I^{0,25}} \right)^{0,76} \quad [2]$$

Donde:

- $T(h)$ es el tiempo de concentración
- L (km) es la longitud del cauce
- I (m/m) es la pendiente media del cauce

Otro parámetro que puede ser interesante para aplicar el método es el del tiempo de retardo, que se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{lag} = 0,6 \cdot T_c \quad [3]$$

Aplicando las ecuaciones [2] y [3] sobre los parámetros de la Tabla 6 donde se indican longitudes y pendientes de cada subcuenca, se obtienen los resultados de la Tabla 7.

Cuenca	Max Z (m)	Min Z (m)	L (km)	I (m/m)
Guazumal	493.0	228.0	9.7	0.0273
Gurabao	600.0	252.8	13.0	0.0267
Hondo	295.0	234.8	8.0	0.0075
Yaque	1754.0	176.9	97.0	0.0163

Tabla 6: Longitud y pendientes de las cuencas

Cuenca	Tc (h)	Tlag (h)
Guazumal	3.3	2.0
Gurabao	4.2	2.5
Hondo	3.7	2.2
Yaque	21.2	12.7

Tabla 7: Tiempos de concentración

5.1.4. Curvas IDF

Como ya se ha establecido en el apartado 4 hay 3 periodos de retorno a estudiar 10, 100 y 500 años.

Para ajustar los datos de las curvas, puesto que los tiempos de concentración en algún caso van a ser inferiores a la hora, se ha creído conveniente ajustar a un modelo de Linsley.

La modelación de curvas IDF propuesta por Ray Linsley en 1967 parte en dos estas curvas para poder considerar tiempos de

concentración inferiores a la hora, tal y como sucede en el presente estudio.

$$I = \frac{a}{T_c + b} \text{ si } T_c < 60 \text{ min} \quad [4]$$

$$I = \frac{a}{T_c^b} \text{ si } T_c > 60 \text{ min} \quad [5]$$

En donde:

- I es la intensidad de la precipitación en mm/h.
- a y b son dos parámetros del modelo a estimar.
- T_c es el tiempo de concentración de la cuenca en horas.

Aplicando las ecuaciones 4 y 5 (Linsley, Kohler and Paulhus, 1967) sobre los datos de las curvas de la [Figura 6] en formato DAT² se obtienen los parámetros a y b del modelo. Mediante un ajuste elaborado con un script para MATLAB se ha procedido al ajuste de las curvas obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla 8.

Retorno (años)	T _c (min)	a	b	R ²
10	<60	118.200	3.538	0.9847
	>60	39.040	0.662	0.9991
100	<60	150.500	2.291	0.9744
	>60	65.400	0.734	0.9926

² El formato DAT es comúnmente utilizado para la transferencia de grandes cantidades de datos en formato binario

Retorno (años)	Tc (min)	a	b	R ²
500	<60	169.500	1.515	0.9670
	>60	89.600	0.787	0.9850

Tabla 8: Parámetros para el modelo de Linsley

Como puede verse en la Tabla 8, todos los casos el coeficiente de correlación R^2 es muy cercano a 1 por lo que se demuestra la validez de las aproximaciones a las curvas consideradas para este estudio.

5.1.5. Hietograma de avenida

Conocida la intensidad y continuando con la aplicación de la norma 5.2 IC de drenaje, es necesario calcular un hietograma de la avenida, el cual, es necesario para la aplicación del modelo HEC-HMS.



Figura 24: Conceptualización del problema en el modelo HEC-HMS

Para construir el hietograma es necesario definir previamente unos intervalos de tiempo coherentes con el tiempo de concentración de las cuencas a estudiar. Por su similitud, las cuencas de arroyos Gurabao y Hondo, junto a la del río Guazumal, se pueden establecer en un T_c de 4 horas el cual se va a calcular en intervalos de 20 minutos (0.333h). Por su parte la cuenca del Yaque, va a dividirse en intervalos de 30 minutos (0.5h) por su mayor tiempo de concentración T_c . Hasta alcanzar las 21.5 horas ajustadas al T_c de la cuenca.

Para dichos tiempos de concentración, tal como se ha enunciado en el apartado 5.1.4, ha sido necesario hacer un ajuste de las curvas para T_c pequeños. Aplicando el ajuste se obtienen los resultados de la [Figura 25] para el caso de las cuencas de T_c en torno a 4 horas y de la [Figura 26], para la cuenca del Yaque.

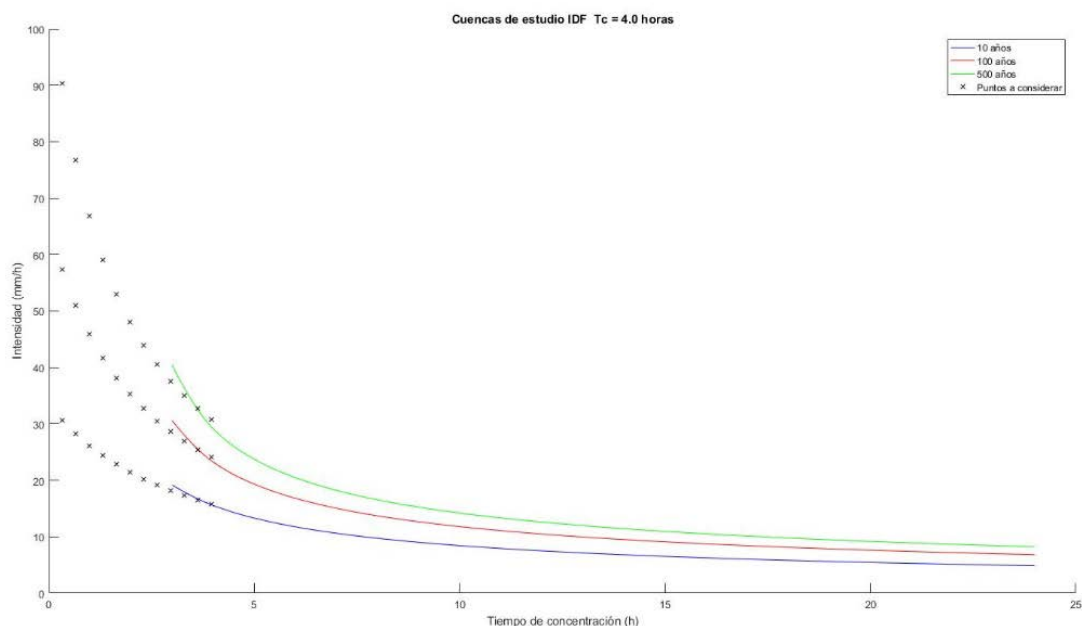


Figura 25: Precipitaciones para intervalos de 0.33 horas

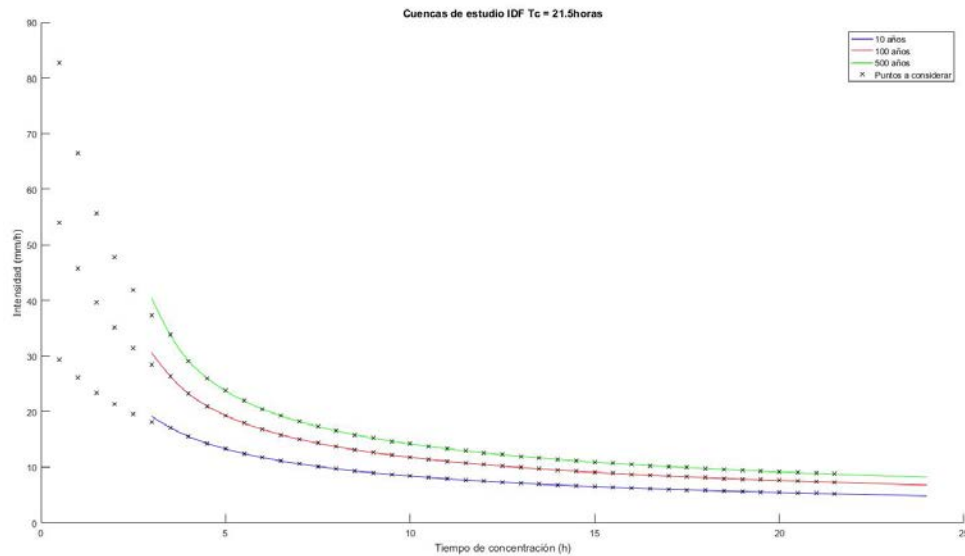


Figura 26: Precipitaciones para intervalos de 0.5 horas

Con los datos de precipitaciones, aplicando el método de los bloques alternos (Chow, Maidment and Mays, 1994), se obtienen los hietogramas que se muestran a continuación para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

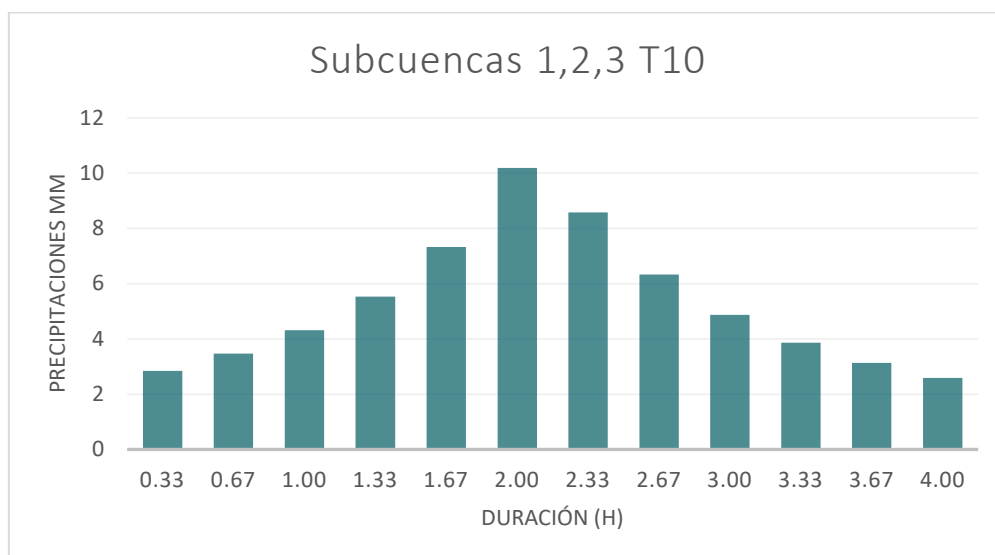


Figura 27: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 10 años de retorno

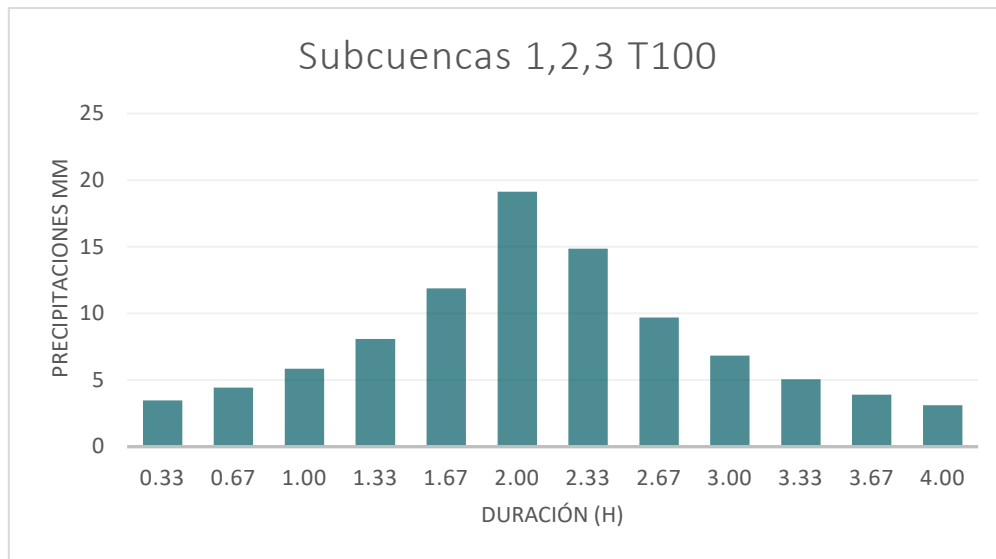


Figura 28: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 100 años de retorno

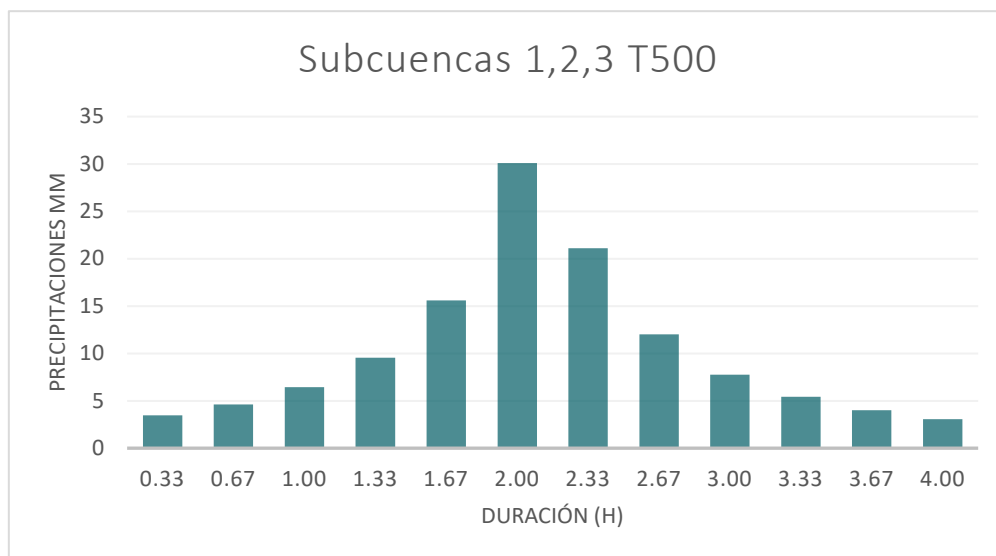


Figura 29: Hietograma de diseño Gurabao, Guazumal, Hondo para 500 años de retorno

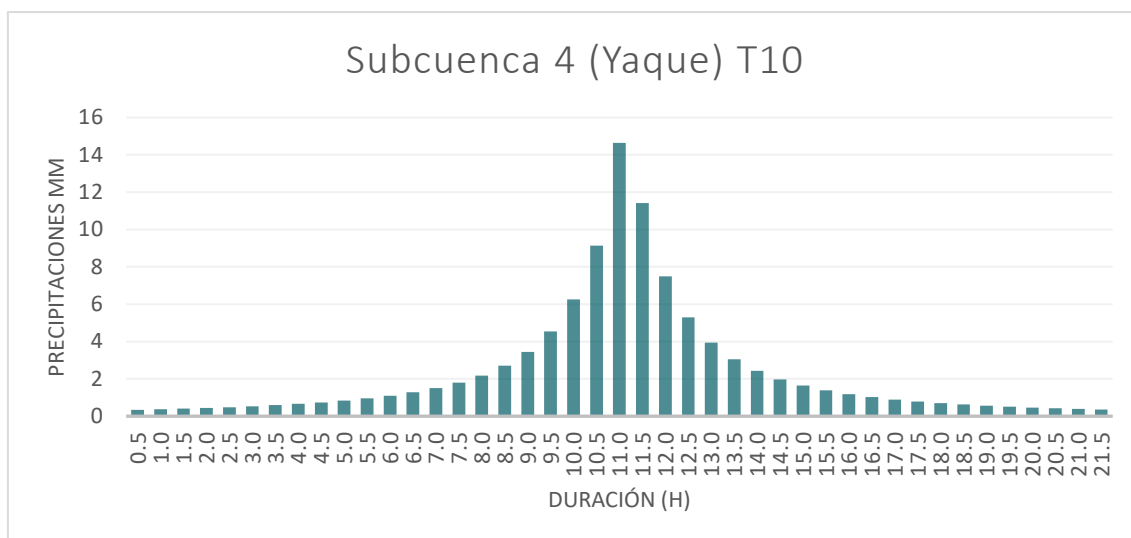


Figura 30: Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 10 años de retorno

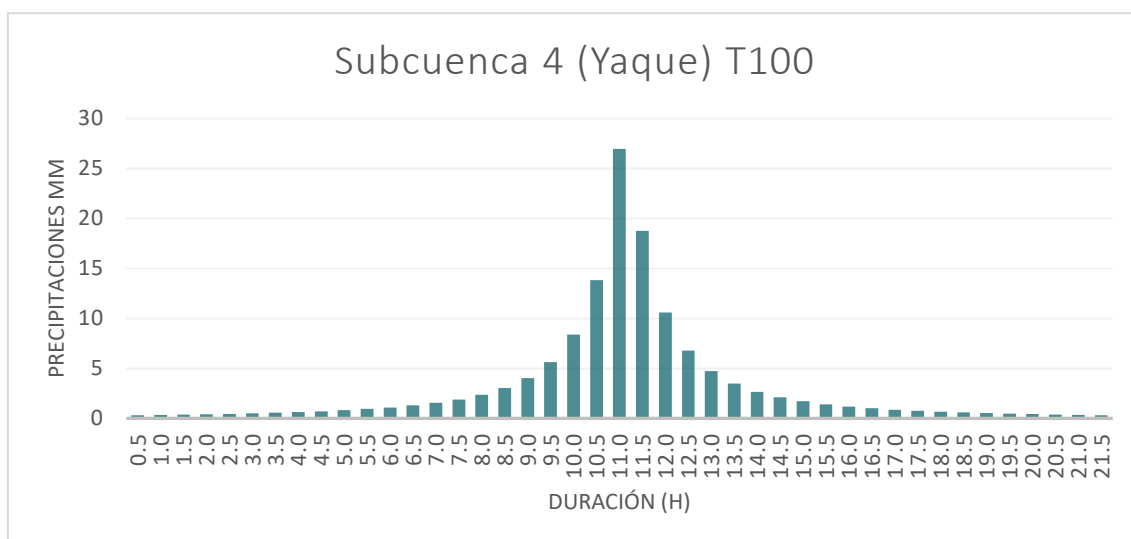


Figura 31: Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 100 años de retorno

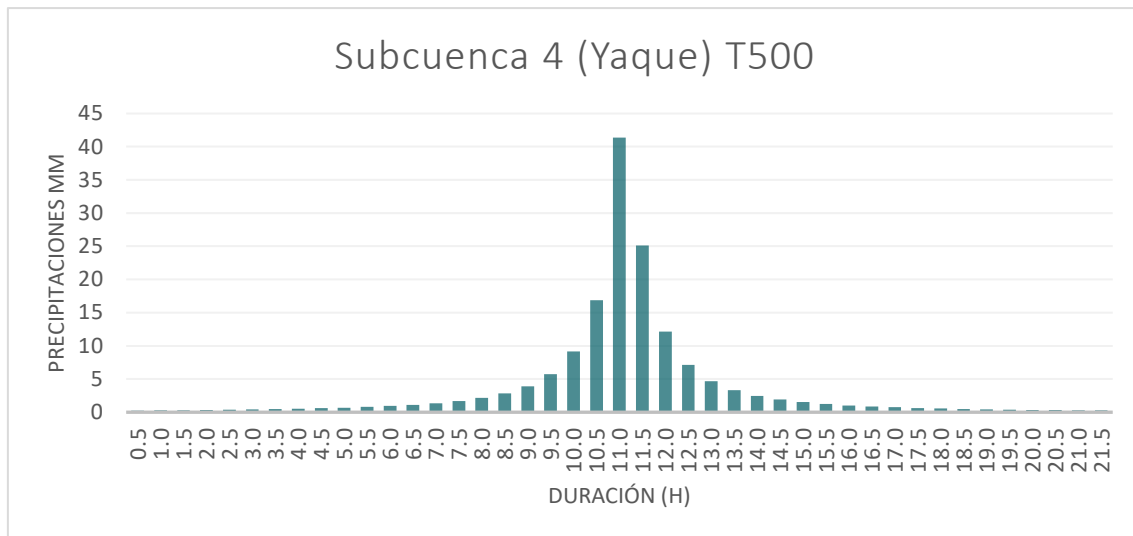


Figura 32 Hietograma de diseño cuenca del Yaque para 500 años de retorno

5.1.6. Hidrogramas de avenida

Introduciendo los parámetros calculados en los apartados anteriores al modelo HEC-HMS, es posible calcular los hidrogramas de avenida para los 3 periodos de retorno estudiados en cada una de las cuencas.

Cabe destacar por encima de las otras tres, la cuenca del río Yaque del norte como se puede ver en la Figura 36 con caudales de avenida que superan en más de 20 veces a los de sus afluentes

Se representan de manera conjunta los arroyos Guazumal y Hondo con el río Gurabao puesto que son valores similares de caudales Figura 33, Figura 34 y Figura 35.

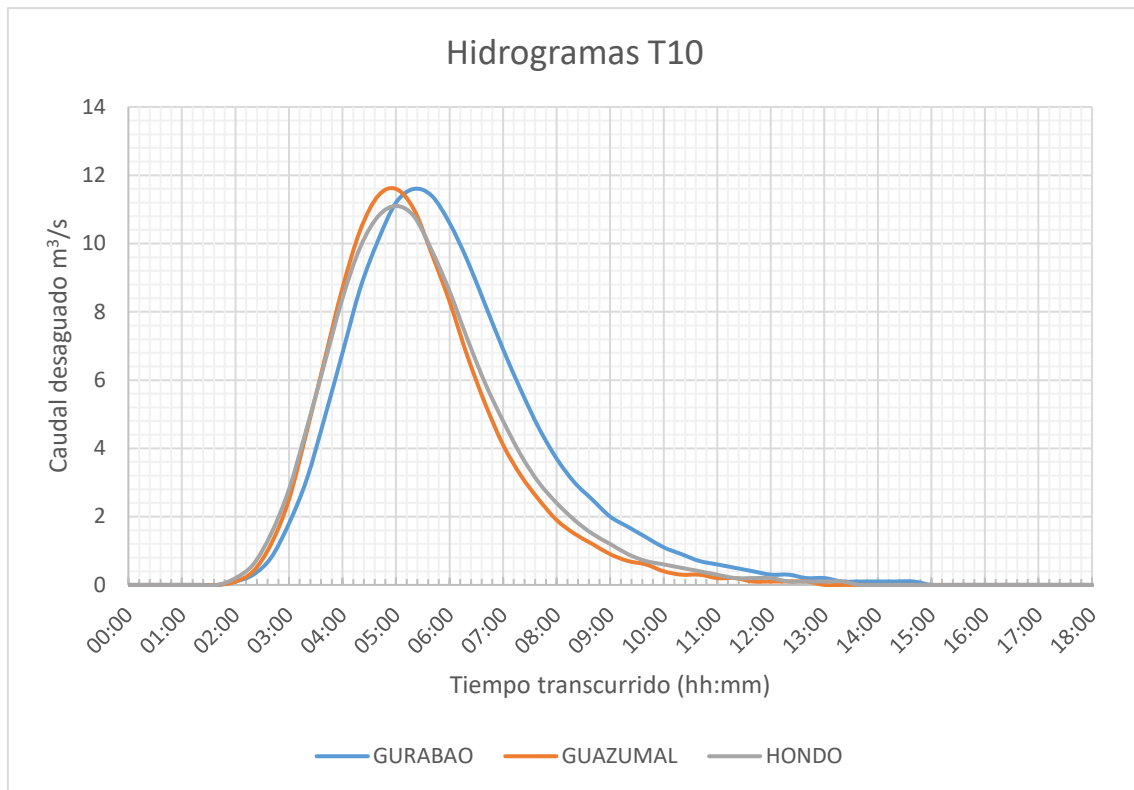


Figura 33: Hidrogramas para $T = 10$ años de los afluentes del Yaque

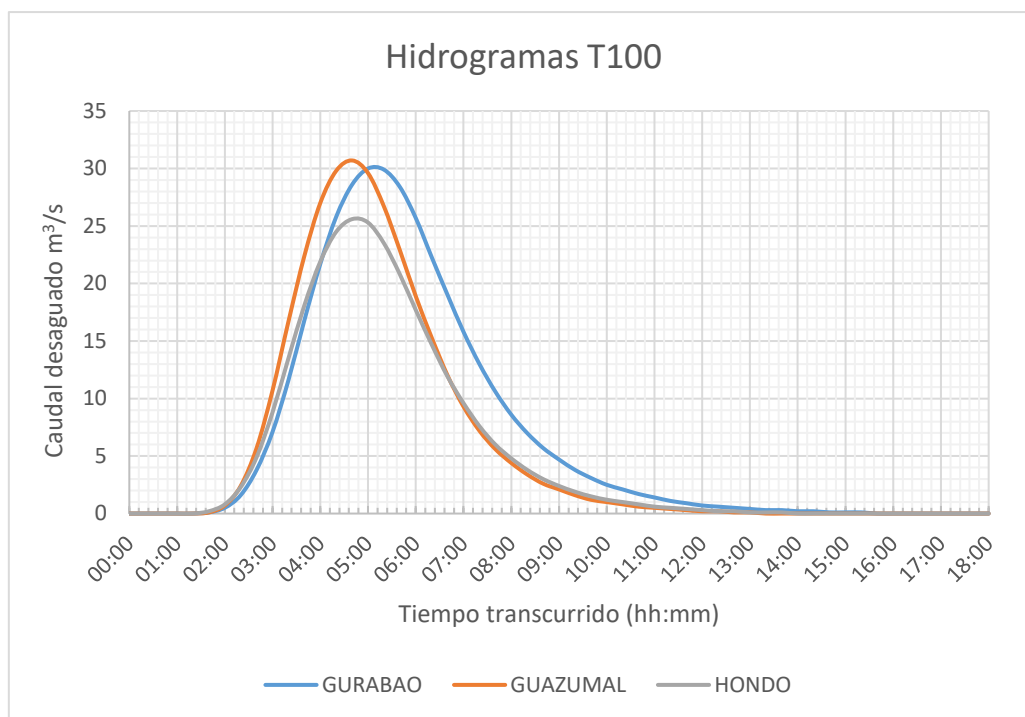


Figura 34: Hidrogramas para $T = 100$ años de los afluentes del Yaque

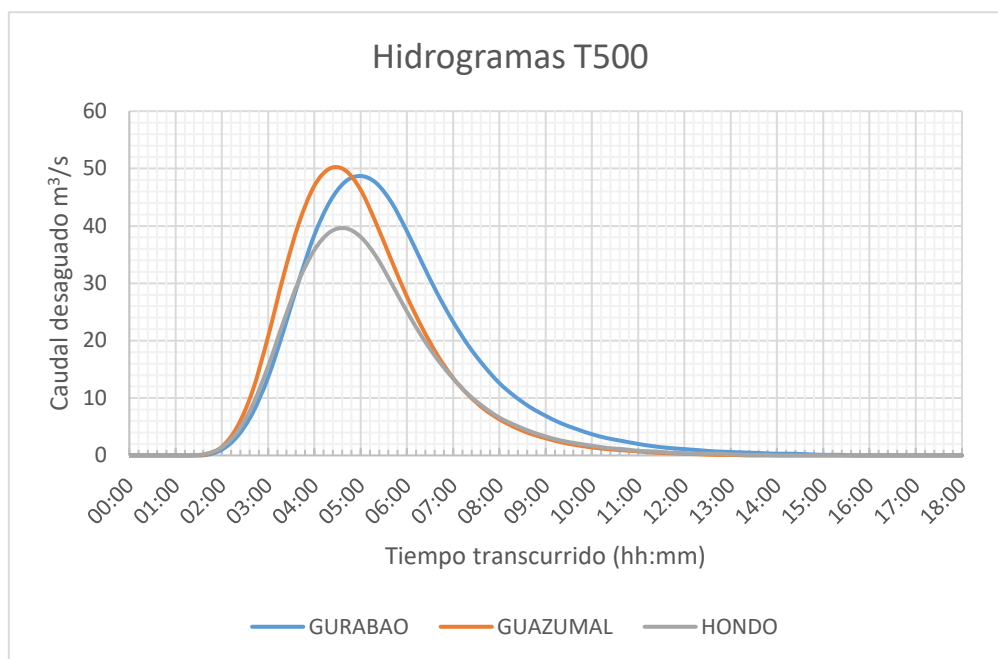


Figura 35: Hidrogramas para $T = 500$ años de los afluentes del Yaque

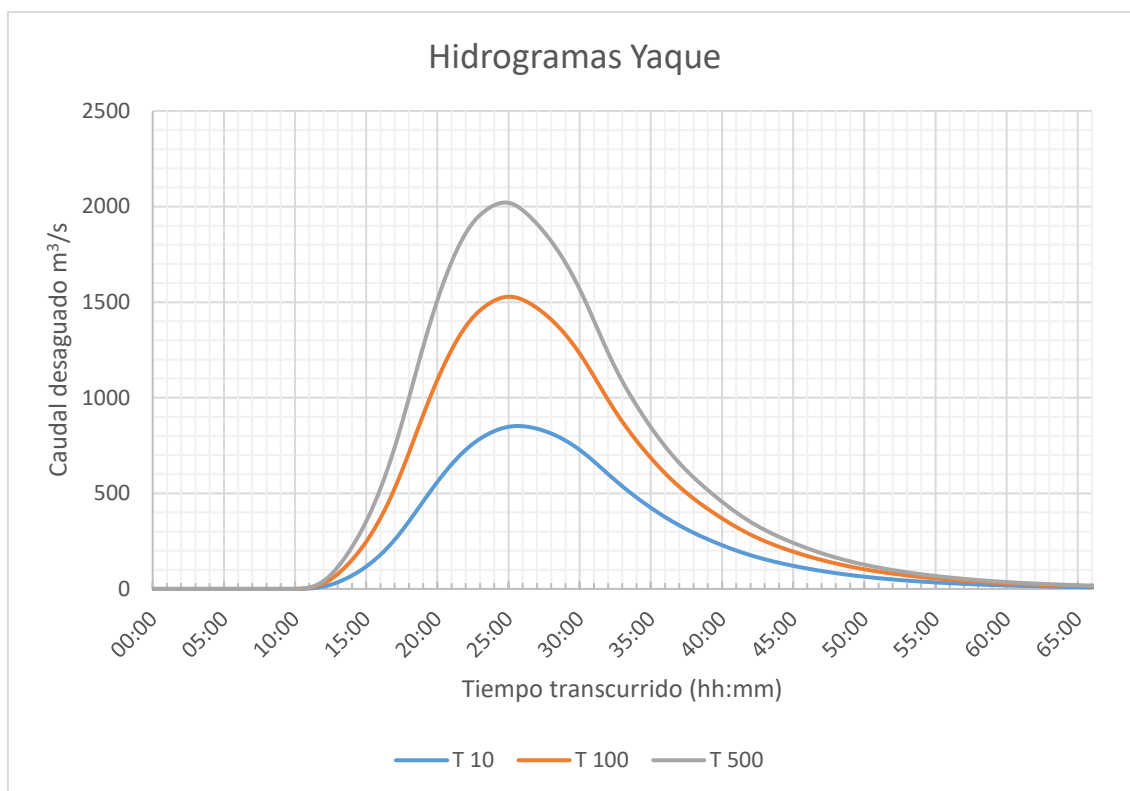


Figura 36: Hidrogramas de avenida del Yaque para 10, 100 y 500 años de retorno

5.1.7. Caudales máximos de avenida

En las figuras del apartado 5.1.6 se pueden ver los caudales máximos de avenida que serán los datos de partida del estudio hidráulico.

En la Tabla 9 se resumen los máximos para cada periodo de retorno y curso de agua. Asimismo en la Tabla 9, se pueden comparar los caudales de los afluentes del río Yaque, y constatar su escasa relevancia respecto a los valores del cauce principal de la Tabla 9.

Periodo de retorno	Río	Caudal Máx. M3/S
10	GUAZUMAL	11,6
	GURABAO	11,6
	HONDO	11,1
	YAQUE	852,2
100	GUAZUMAL	30,7
	GURABAO	30
	HONDO	25,6
	YAQUE	1528,5
500	GUAZUMAL	50
	GURABAO	48,7
	HONDO	39,6
	YAQUE	2021

Tabla 9: Caudales máximos para cada periodo de retorno

5.2. Estudio Hidráulico

Empleando la metodología descrita en el apartado 4.2 se ha realizado un estudio de inundación para los caudales máximos recogidos en la Tabla 9

5.2.1. Caracterización geométrica previa

Partiendo de los datos de un modelo digital del terreno con una resolución de 2 metros y los cauces obtenidos en el apartado 5.1.1 dentro de la zona urbana de Santiago de los Caballeros, se procede mediante la herramienta HEC GeoRAS a realizar una conceptualización de la zona.

En la Figura 37 se puede ver el cauce principal del río con las zonas de probable inundación y los cortes transversales elegidos para

su introducción en el modelo HEC – RAS. En este caso se han elegido secciones transversales variables entre 1000 y 1500 metros en función de la zona de inundación afectada que se detecta.

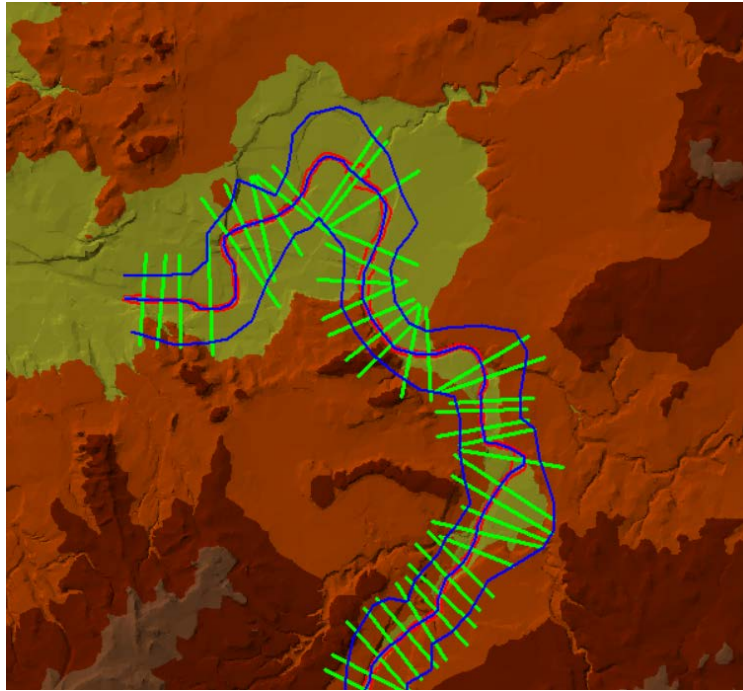


Figura 37: Conceptualización del caudal con ARC-MAP y HEC GEO RAS

Una vez establecidos el cauce, las bermas del río y las zonas de posible inundación, se procede a importarlas como datos de partida geométricos en el programa HEC – RAS.

En la Figura 38 y en la Figura 39 se ve la conceptualización en HEC RAS del cauce del Yaque del Norte a su paso por Santiago de los Caballeros. Como el aporte de caudal de los afluentes del Yaque es muy pequeña en comparación con el cauce del río principal no se tiene en cuenta su trazado insertando únicamente su caudal como un aporte puntual (Apartado 5.1.7).

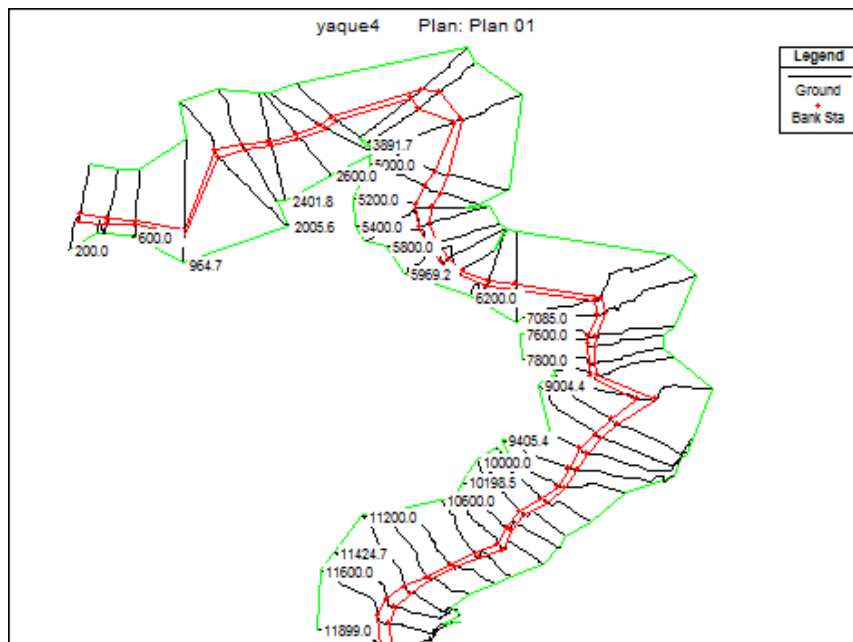


Figura 38: Conceptualización 3D de la geometría del cauce y las secciones en HEC RAS

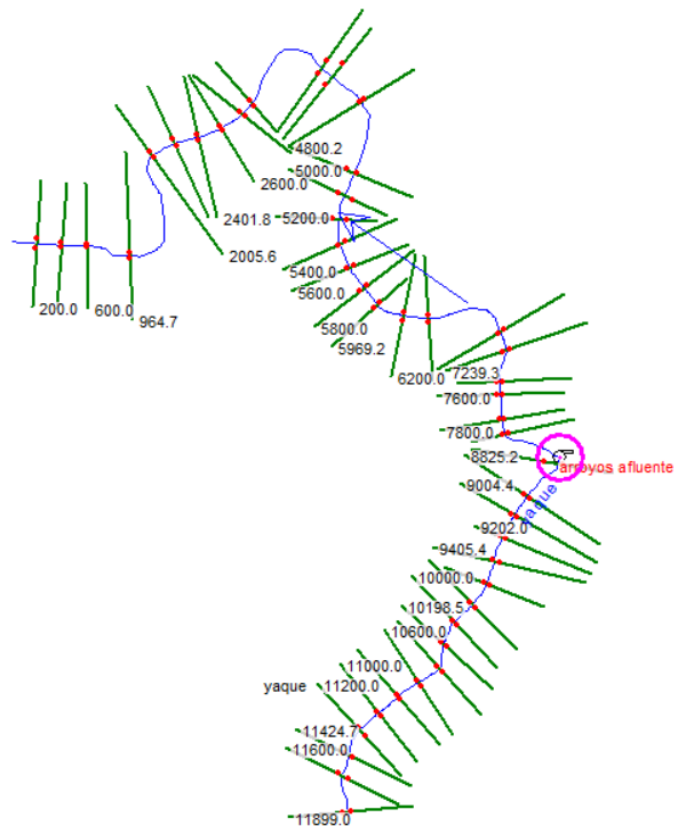


Figura 39: Conceptualización geométrica en planta

5.2.2. Rugosidad del canal

Como una de las condiciones de contorno para aplicar el modelo de inundación HEC RAS, se muestra necesario elegir una rugosidad correcta del fondo del canal y los alrededores a inundar para introducir en el cálculo.

Para su cálculo se ha decidido emplear las tablas facilitadas por (Chow, 1959) y recogida en la Figura 40 y se han elegido unas rugosidades de $n = 0.025$ para la zona de canal al ser un canal grande con pocas rocas y arbustos, y $n = 0.075$ para la zona de inundación al tratarse de zona urbana

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
A.2.2 Zonas cultivadas			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Figura 40: Posibles valores de la rugosidad (Chow, 1959)

5.2.3. Situación actual

En un primer lugar, tal y como refleja las Figura 41, Figura 42 y Figura 43, generadas mediante la herramienta de estudio unidimensional *HEC-RAS*, numerosas áreas urbanas se ven afectadas por las posibles avenidas derivadas de los 3 periodos de retorno estudiados. Hay que tener en cuenta la unidimensionalidad de los estudios y tomar las áreas inundables como posibles zonas de inundación. Para los 3 periodos de retorno, se han remarcado en rojo en las figuras las zonas urbanas donde es más necesario actuar ante una posible avenida.

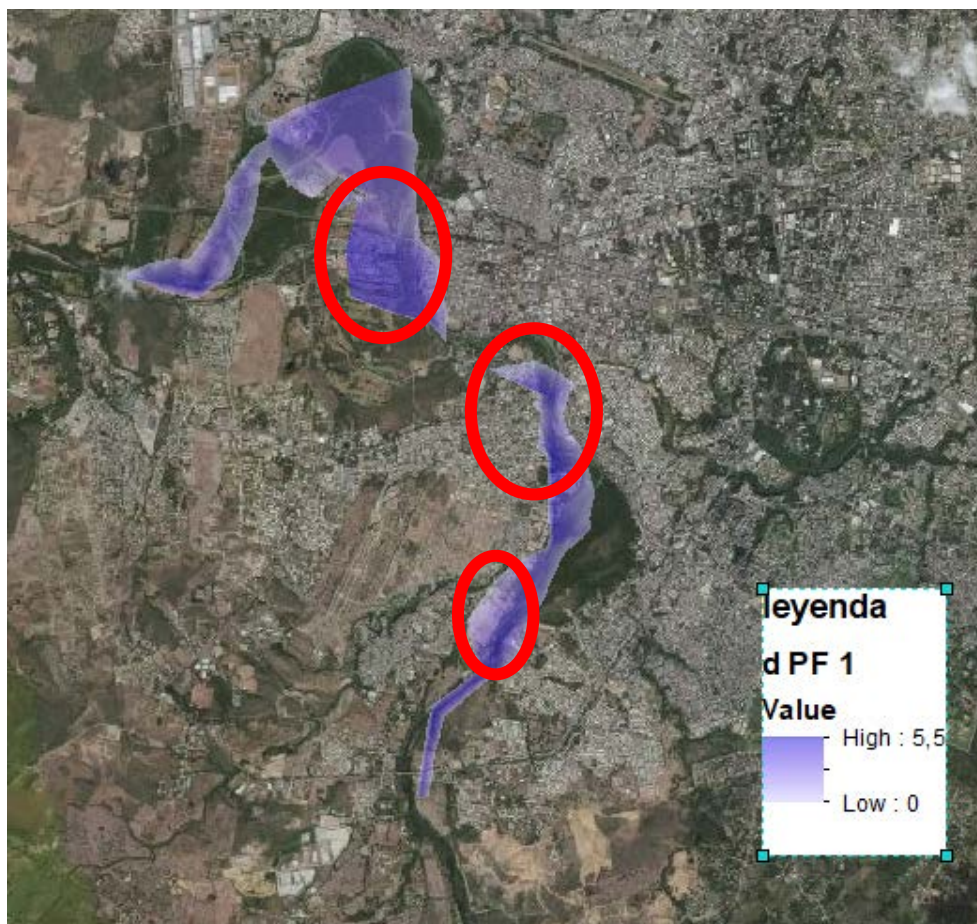


Figura 41: Mapa de inundaciones para $T=10$



Figura 42: Mapa de inundaciones para $T=100$

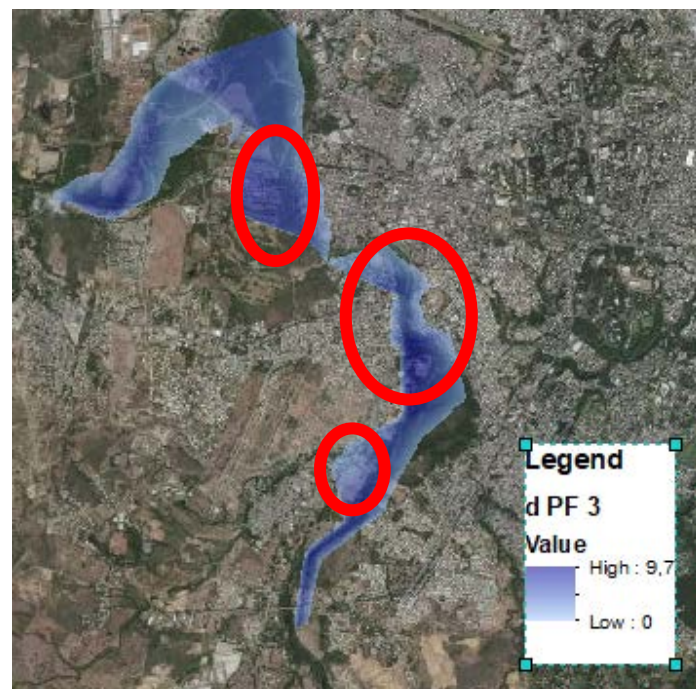


Figura 43: Mapa de inundaciones para $T=500$

Como puede apreciarse, las posibles áreas de inundación sobre zonas ya construidas son muy grandes, llegando a superar las 90 Ha en el caso más desfavorable, dentro de las cuales hay numerosos asentamientos urbanos.

5.2.4. Soluciones propuestas

Ante esta situación inicial de inundaciones, se van a estudiar 3 tipos de secciones para encauzar el río.

La primera de ellas consistirá en un encauzamiento por encajonamiento de todo el cauce del río levantando unos muros a los laterales y forrando la sección de hormigón para hacerla hidráulicamente óptima. Esta solución a priori es la que tiene un mayor índice de riesgo, pues ante un desbordamiento sobre los muros planeados la población quedaría a merced de las avenidas. Por el contrario, este tipo de solución ofrece una mayor liberación de suelo para el desarrollo urbanístico de la ciudad. En la Figura 44, se puede ver una recreación de este tipo de solución que por otro lado sería imprescindible en determinados puntos del río donde hay construcciones existentes.



Figura 44: Sección tipo cajón

Otro tipo de solución que presenta menos nivel de riesgo en caso de superarse los niveles de proyecto es generando una zona de reserva a ambos márgenes del río que se puede liberar para usos de ciudad como un paseo fluvial o una senda ciclable y que sería inundable en caso de avenida. Esta solución contendría un encauzamiento del río para el periodo de retorno de 10 años que permitiría dar una cierta garantía contra inundaciones de la zona recuperada. Hay que destacar que este tipo de sección no sería aplicable en zonas donde las construcciones actuales están demasiado cerca de las márgenes del río obligando a adoptar secciones tipo cajón con su correspondiente zona de transición entre ambas. En la Figura 45 y Figura 46, puede verse el resultado de este tipo de sección que, si bien deja menos espacio liberado para su aprovechamiento urbanístico, presenta por otro lado una mejor integración paisajística.



Figura 45: Sección tipo senda

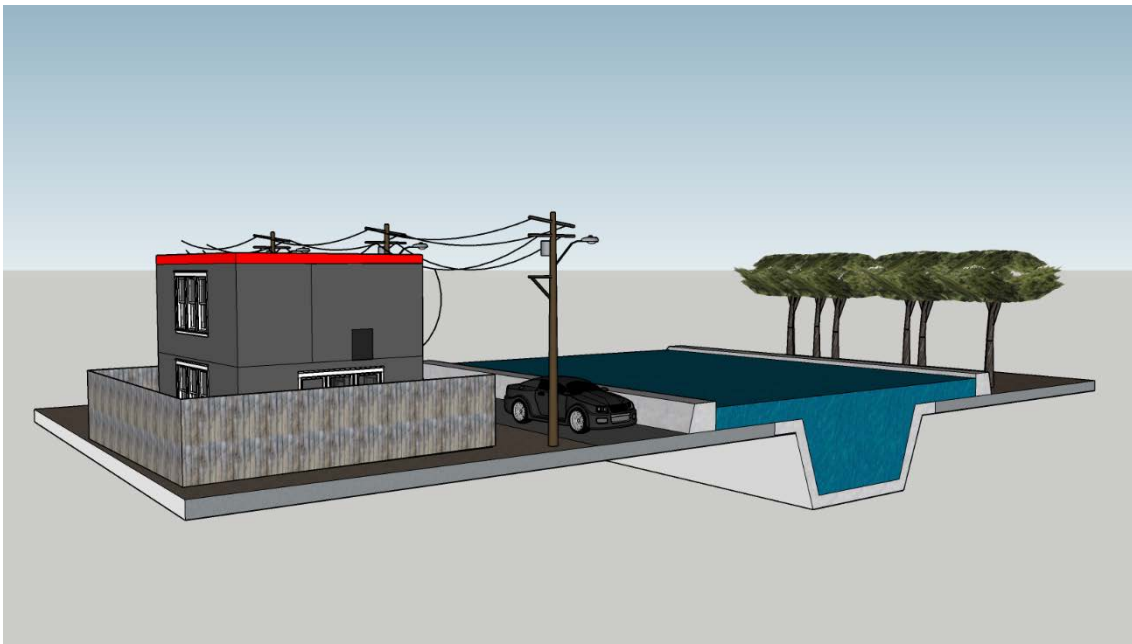


Figura 46: Sección tipo senda inundada

La tercera y última opción que se va a valorar es la generación de una laguna de inundación en aquellas zonas donde las características tanto del terreno como las urbanísticas así lo permitan, que al igual

que en planteamiento anterior también podrá ser empleada para usos ocio culturales de la ciudad generando nuevos espacios de valor dentro de la ciudad. En la infografía de la Figura 47, se propone una solución con zonas verdes y juegos infantiles, pero también podría ser desarrollado un espacio deportivo para los ciudadanos. Este tipo de solución al igual que la anterior iría acompañado de una sección tipo cajón para el cauce actual del río que contuviera las posibles avenidas con un periodo de retorno de 10 años. Por otro lado, cabe destacar que desde el punto de vista del aprovechamiento urbanístico, este tipo de solución se va a presentar como la menos óptima ya que obliga a reservar una gran cantidad de suelo para poder ser inundado Figura 48.

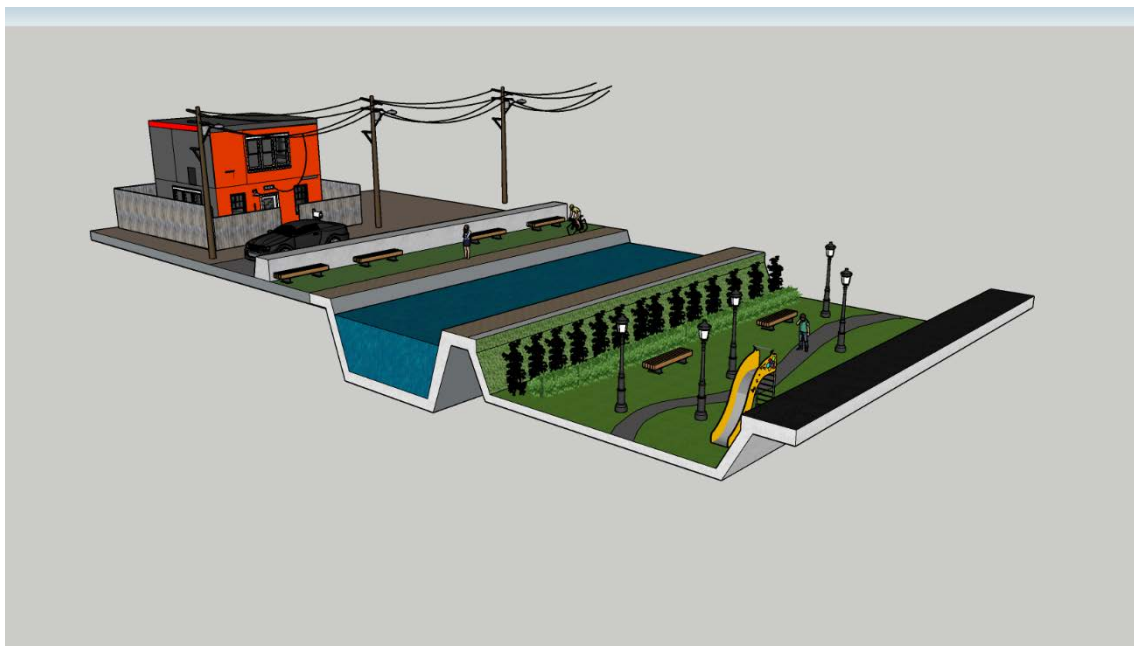


Figura 47: Sección con laguna de inundación

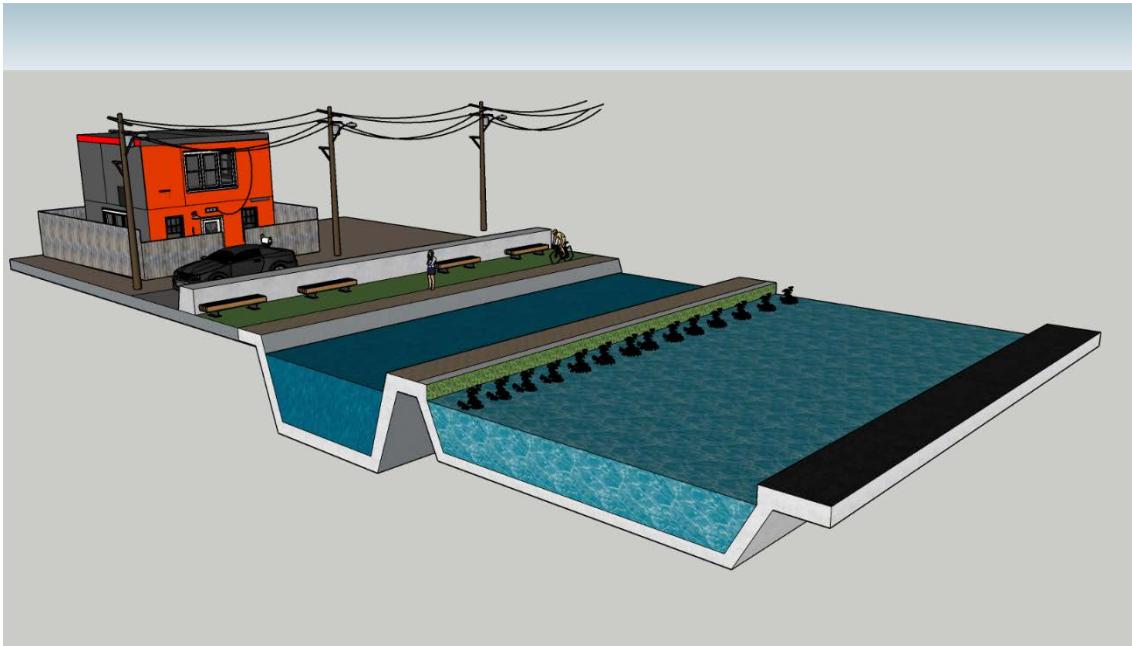


Figura 48: Sección con laguna de inundación inundada

5.2.4.1. Encauzamiento del canal

En primer lugar, se propone la solución más drástica, la cual se basa en un encajonamiento del canal entre muros para evitar las inundaciones como se mostró en la Figura 44. Para el cálculo de los muros se han realizado simulaciones mediante el modelo HEC-RAS obteniendo resultados para 45 secciones en las que se ha subdividido el canal. Ha sido necesario tener en cuenta las condiciones de simulación del software que en ocasiones imposibilitan un estudio completamente preciso y riguroso del cauce en su conjunto.

En las Tabla 10 y Tabla 11 se comprueba el efecto del encauzamiento en una sección determinada del canal para los 3 periodos de retorno estudiados. Comprobando como se evitan desbordamientos en determinadas condiciones de volumen de agua. (Pueden consultarse los anexos I y II para comprobar los resultados en cada sección).

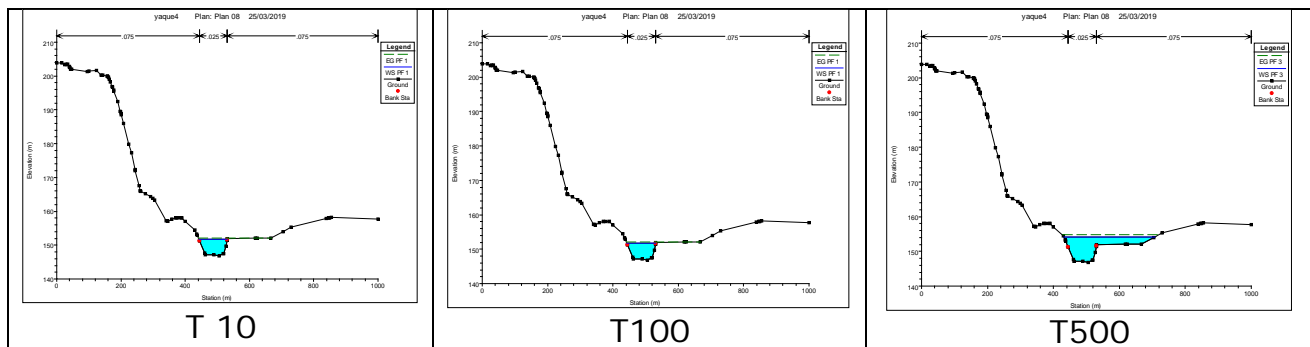


Tabla 10 Ejemplo de secciones sin encauzar

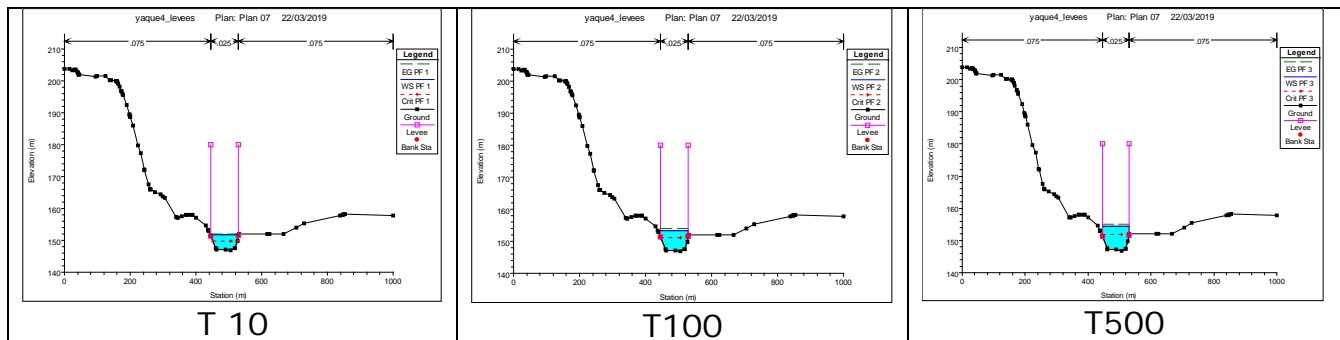


Tabla 11 Ejemplo de secciones encauzadas

Como se puede observar, el efecto de inundación queda completamente paliado mediante el encauzamiento empleando muros, evitando los posibles riesgos de inundación. El resultado es una sección muy compacta y definida Figura 49.

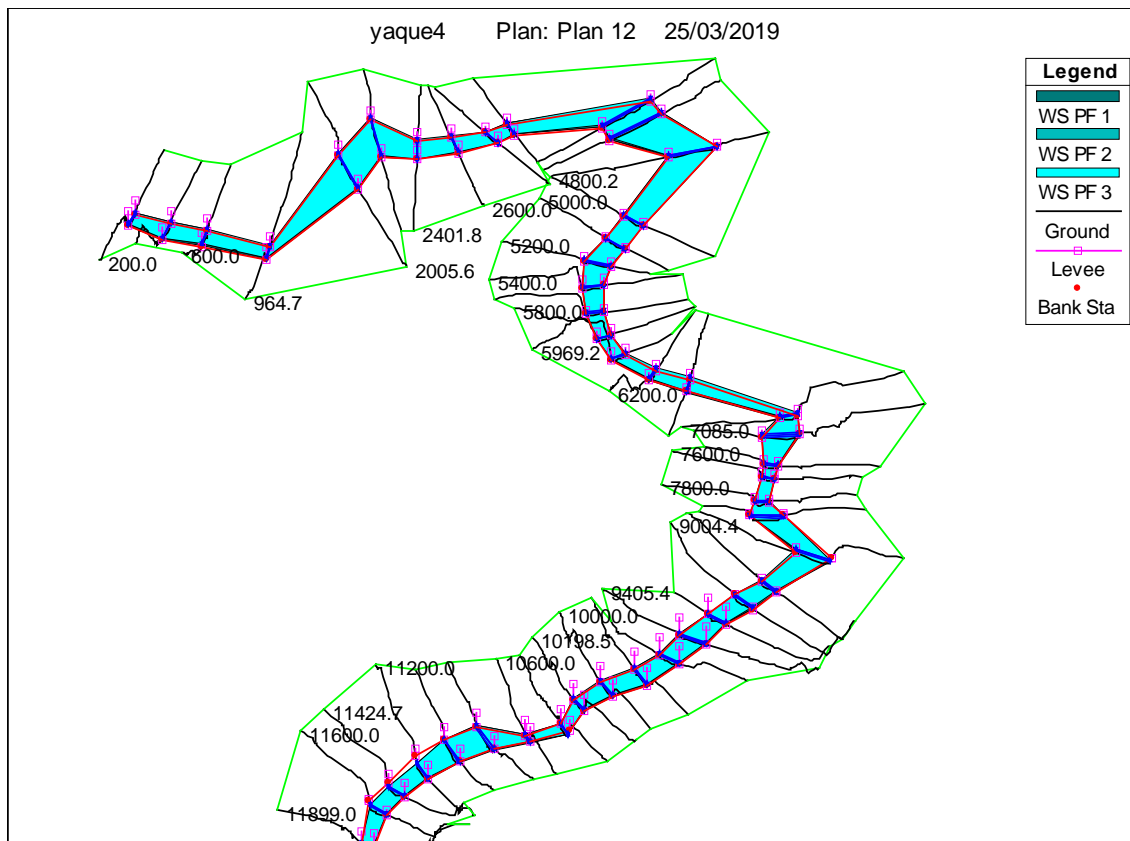


Figura 49: Vista aérea de las secciones encauzadas

En el ejemplo de sección de 500 años, puede comprobarse uno de los inconvenientes fundamentales de esta solución que es la necesidad de elevar los muros sobre la altura de las viviendas como se puede comprobar en la Figura 50.

Además, hay que tener en cuenta los efectos de una avenida superior a la proyectada para a la altura de los muros y la guarda, que puede generar importantes inundaciones sobre viviendas, áreas urbanas y población, Figura 51.

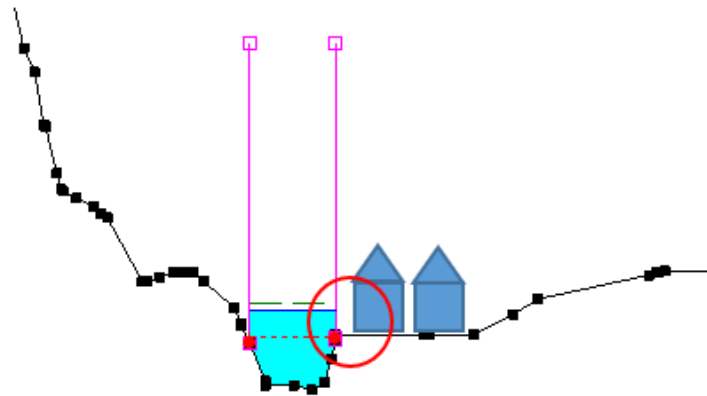


Figura 50: Efecto del muro sobre las viviendas



Figura 51: Sección tipo cajón con inundación.

5.2.4.2. Encauzamiento parcial

Otra posible solución a plantear es adecuar el encauzamiento a las características del terreno Figura 45, generando una sección mayor a la actual en las zonas donde fuera posible y manteniendo una sección tipo cajón como la ya propuesta en el apartado anterior en zonas

urbanas donde no se puede adoptar otra actuación. Como puede compararse en las Figura 49 y Figura 52, el área ocupada por el agua con esta solución es mayor pero con el consiguiente menor gasto de material y de impacto.

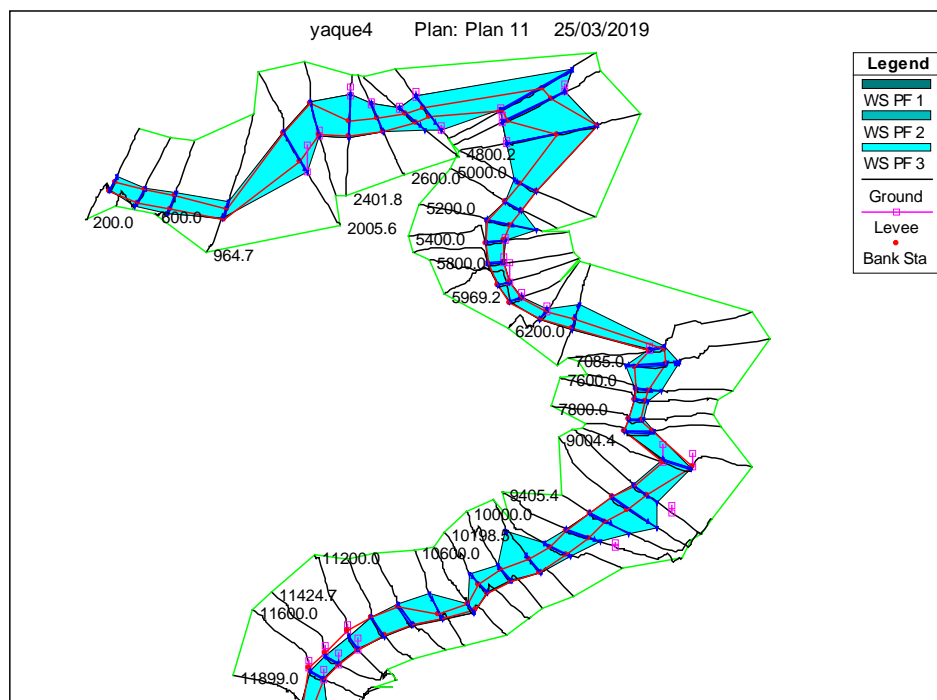


Figura 52: Vista aérea de la solución con encauzamiento parcial

En esta solución se plantea una sección de río amplia en secciones inundables perdiendo más cantidad de suelo, pero generando un menor impacto visual sobre las viviendas y desarrollos urbanísticos colindantes al cauce. Tabla 12.

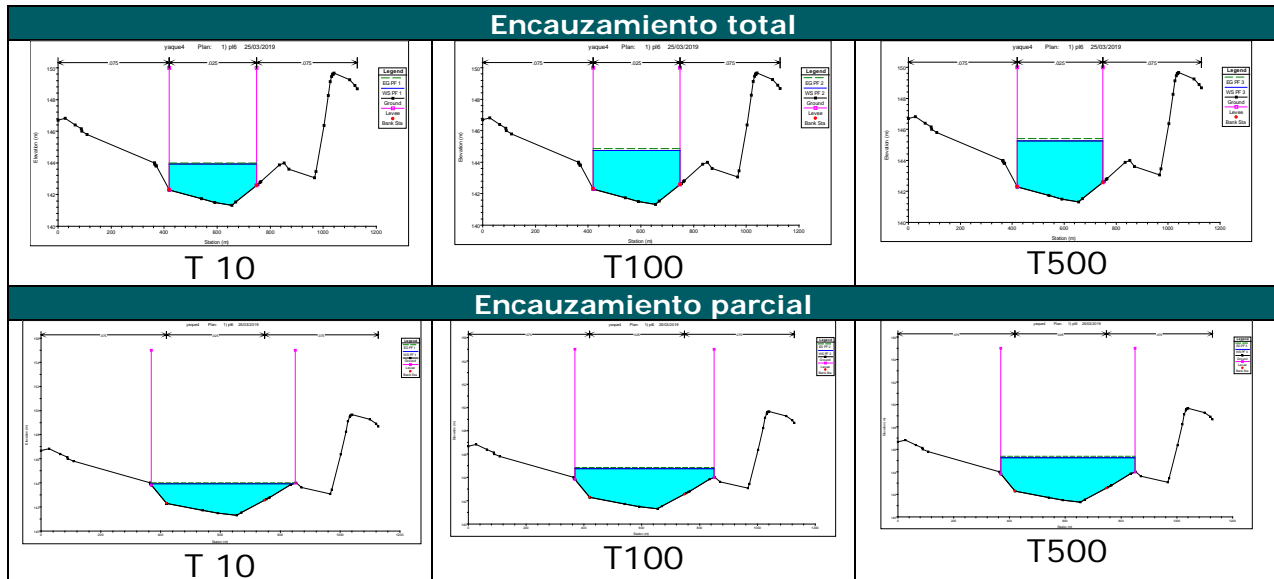


Tabla 12 Comparativa sección encauzamientos totales y parciales

5.2.4.3. Generación de lagunas de inundación

La última de las soluciones planteadas consiste en la generación de una laguna de inundación que sea capaz de contener los excesos de caudal provenientes de las avenidas correspondientes a los 3 periodos de retorno estudiados Figura 47 y Figura 48.

La ubicación elegida es la que se muestra en la Figura 53, en la zona conocida como Bellavista, puesto que se encuentra en la entrada de la zona habitada y puede ayudar a mitigar el riesgo previsto.

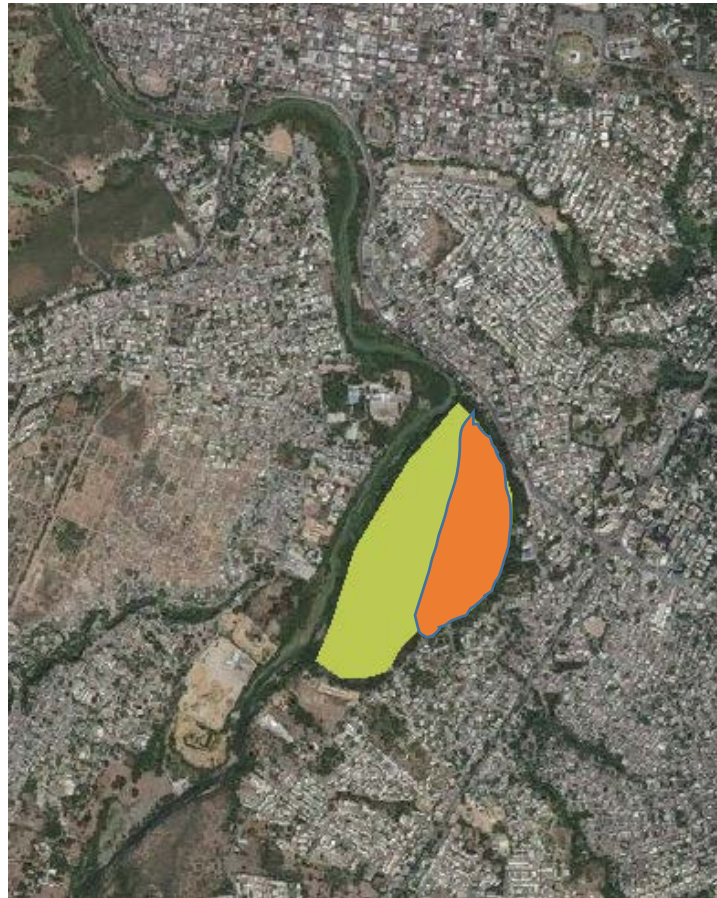


Figura 53: Ubicación de la laguna de inundación, propuesta inicial (amarillo + naranja), propuesta final (amarillo)

En su estudio se ha calculado la laguna con una cota inferior de 150 m., por lo que la media de profundidad será de 2.5 metros.

Aplicando de nuevo el modelo HEC-RAS se generan 3 mapas de inundación para los periodos de retorno a estudiar. (Figura 54, Figura 55 y Figura 56). Como resultado de aplicar el modelo, se ha decidido recortar la laguna de su posición inicial (amarillo + naranja Figura 53) al área finalmente elegida (amarillo Figura 53) con el consiguiente ahorro en la excavación.

Como se observa en las citadas figuras el funcionamiento de la laguna no es perfecto, siendo necesario además tomar otro tipo de

medidas correctoras como el encauzamiento mediante cajón o muros laterales en las partes más proclives al desbordamiento del río.



Figura 54: Inundación con laguna para $T=10$



Figura 55: Inundación con laguna para $T=100$

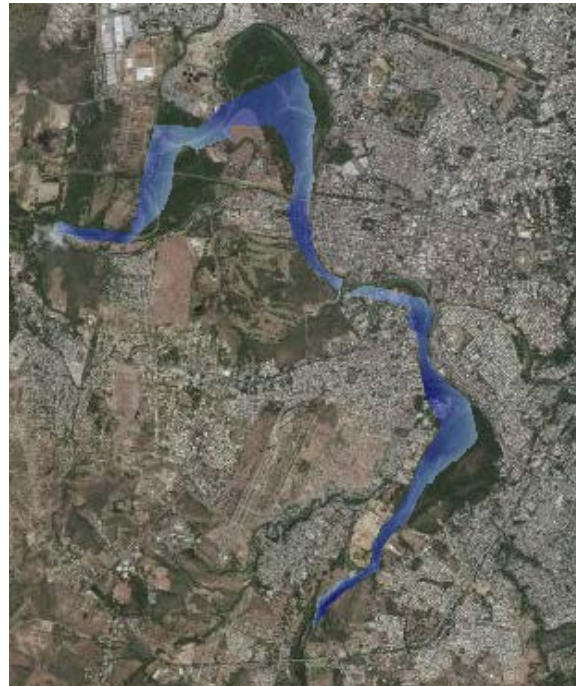


Figura 56: Inundación con laguna para $T=500$

Como se aprecia en la Figura 57 se muestra necesario incluir barreras de contención en la parte final del cauce para evitar la inundación de las áreas urbanas próximas y así poder dar a la laguna la finalidad buscada.

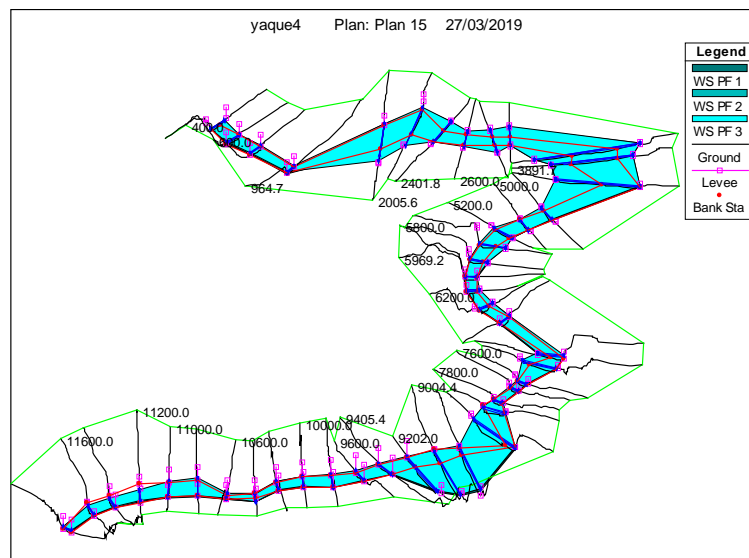


Figura 57: Vista aérea de la solución con lagunas de inundación

5.2.5. Comparativa niveles de agua

A continuación, se muestran en la Figura 58 la comparativa de los perfiles longitudinales del río para un periodo de retorno de 500 años donde pueden compararse las alturas de la lámina de agua con cada una de las soluciones.

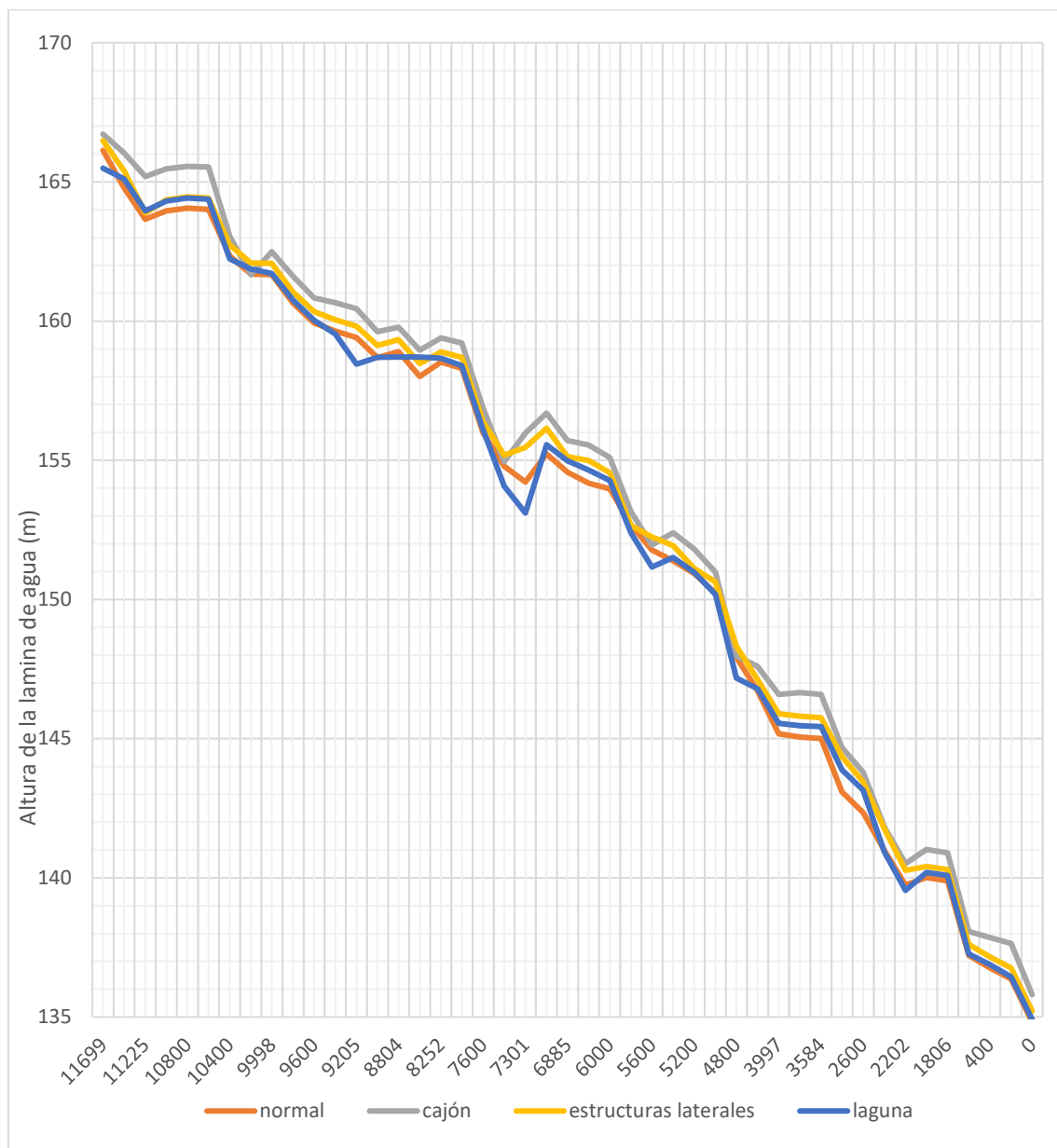


Figura 58: Comparativa altura láminas de agua para las diferentes soluciones

En el gráfico de la Figura 58, puede apreciarse además que se producen efectos como los ya predichos de una mayor altura de la lamina de agua en la solución de encajonamiento. Mientras que evidentemente la laguna hace una mitigación mas evidente de las avenidas produciendo unos calados en régimen subcrítico similares a los estudiados en el régimen normal. En la Tabla 13, se ofrece en detalle los resultados de la altura de la lámina de agua para este caso de 500 años que se muestra más significativo que los 2 anteriores.

Longitud Río	normal	cajón	estructuras laterales	laguna
11698.98	166.13	166.71	166.48	165.49
11400.00	164.78	166.04	165.40	165.11
11224.72	163.66	165.19	163.88	163.96
11000.00	163.96	165.47	164.35	164.32
10800.00	164.06	165.56	164.46	164.42
10600.00	164.02	165.53	164.42	164.38
10400.00	162.34	163.05	162.74	162.24
10200.00	161.69	161.67	162.09	161.87
9998.48	161.67	162.49	162.07	161.71
9800.00	160.65	161.61	161.05	160.76
9600.00	159.94	160.84	160.34	160.03
9400.00	159.65	160.65	160.05	159.54
9205.40	159.41	160.45	159.81	158.46
9001.97	158.69	159.62	159.13	158.70
8804.36	158.91	159.78	159.33	158.71
8625.16	158.01	158.96	158.48	158.71
8251.65	158.52	159.40	158.89	158.66
7720.45	158.30	159.21	158.70	158.40
7600.00	155.99	156.88	156.39	156.11
7400.00	154.78	154.95	155.18	154.07
7301.29	154.21	155.98	155.46	153.11
7039.33	155.23	156.69	156.15	155.56
6884.97	154.57	155.71	155.13	154.98
6200.00	154.18	155.54	154.99	154.65
6000.00	153.97	155.10	154.55	154.28
5769.23	152.68	153.14	152.65	152.39

Longitud Río	normal	cajón	estructur as laterales	laguna
5600.00	151.78	151.96	152.25	151.17
5400.00	151.38	152.40	151.93	151.50
5200.00	150.92	151.81	151.11	150.97
5000.00	150.23	150.98	150.63	150.18
4800.00	147.92	147.97	148.32	147.18
4600.22	146.72	147.59	147.12	146.79
3996.95	145.17	146.59	145.89	145.55
3691.69	145.06	146.65	145.80	145.46
3583.85	145.01	146.58	145.75	145.43
2715.01	143.09	144.68	144.35	143.88
2600.00	142.35	143.79	143.45	143.15
2400.00	140.99	141.83	141.77	140.94
2201.81	139.74	140.52	140.27	139.54
2010.25	140.01	141.02	140.41	140.19
1805.56	139.90	140.90	140.30	140.08
764.73	137.21	138.07	137.61	137.27
400.00	136.76	137.86	137.16	136.88
200.00	136.37	137.64	136.77	136.45
0.00	134.81	135.80	135.21	134.92

Tabla 13: Niveles de la lámina de agua para T500

5.2.6. Estudio económico

Una vez expuestas las tres soluciones planteadas se va a realizar un estudio económico sencillo para evaluar el orden de magnitud del coste que supondría realizar cada una de las alternativas propuestas.

En el caso de encauzamientos se ha calculado el volumen del muro de hormigón y/o de escollera que se estima será necesario en cada uno de los casos. Para ello se ha utilizado la normativa recogida en el PG3 (Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes de la Dirección General de Carreteras) eligiendo muro de 1m de ancho con bloques de piedra sin clasificar, de tipo granítico.

En caso de ser necesario muro de hormigón por las características del terreno para contener el muro de escollera, se ha empleado Hormigón hidrófugo según la normativa española de hormigones Art. 8.2 EHE-08.

Por último, para el caso de generación de laguna, será necesario realizar una excavación de desmonte de los terrenos que ocupará la laguna, resultando necesario el siguiente material y suponiendo que la excavación se realice en zona de tierra disgregada.

En la Tabla 14, se recogen los precios por m³ de las 3 principales unidades de obra a realizar y que se van a tener en cuenta para realizar la aproximación de coste de las soluciones.

En todos los casos hay que tener en cuenta unos costes fijos de estabilización y encauzamiento del canal existente que es necesario revestir en hormigón según las secciones tipo de las Figura 44, Figura 45 y Figura 47, que como es el mismo para todas las secciones y con un coste de unos 50 millones de € queda recogido en la Tabla 15, y se muestra en la suma final de la Tabla 16, Tabla 17 y la Tabla 19.

m ³ de muro de escollera	m ³ de muro hormigón	m ³ de excavación
145.80 €	349.50 €	9.80 €

Tabla 14 Precio de las principales unidades de obra a considerar

Área M2	Longitud m	Volumen m3	€/m3	TOTAL
28.5	11900.00	339150.00	145.80 €	49,448,070.00 €

Tabla 15 Precio de la estabilización del cauce

Retorno	T10	T100	T500
Altura muro m	1.45	3.25	3.75
Longitud m	11900.00	11900.00	11900.00
Anchura m	0.50	0.50	0.50
Volumen m3	17255	38675	44625
€/m3	349.50 €	349.50 €	349.50 €
Precio solución	6,030,679.44 €	13,517,040.13 €	15,596,584.76 €
Total con revestimiento	55,478,749.44 €	62,965,110.13 €	65,044,654.76 €

Tabla 16 Precio de la solución cajón

Retorno	T10	T100	T500
Altura muro m	0.65	1.8	2.6
Longitud m	11900.00	11900.00	11900.00
Anchura m	0.50	0.50	0.50
Volumen m3	7735	21420	30940
€/m3	349.50 €	349.50 €	349.50 €
Precio solución	2,703,408.03 €	7,486,360.69 €	10,813,632.10 €
Total con revestimiento	52,151,478.03 €	56,934,430.69 €	60,261,702.10 €

Tabla 17 Precio de la solución con muros laterales

Retorno	T10	T100	T500
Altura muro m	0.45	1.25	1.4
Longitud m	11900.00	11900.00	11900.00
Anchura m	0.50	0.50	0.50
Volumen m3	5355	14875	16660
€/m3	349.50 €	349.50 €	349.50 €
Precio muro	1,871,590.17 €	5,198,861.59 €	5,822,724.98 €

Tabla 18 Precio de los muros de la solución con laguna

Retorno	T10	T100	T500
Escavación m2	245000	245000	245000
Altura m	0.75	1.85	2.40
Volumen m3	183750.00	453250.00	588000.00
€/m3	9.80 €	9.80 €	9.80 €
Precio excavación	1,800,750.00 €	4,441,850.00 €	5,762,400.00 €
Total con revestimiento	53,120,410.17 €	59,088,781.59 €	61,033,194.98 €

Tabla 19 Precio de la solución con laguna de inundación

En vista de los resultados económicos totales con el revestimiento analizados para los 3 periodos de retorno hay que constatar que la variación económica entre elegir soluciones que protejan a 100 o 500 años es de en torno al 8 – 10 % del presupuesto aproximado de la ejecución. Por ello para poder estar de un lado que garantice la mayor seguridad de los residentes en Santiago de los Caballeros, deberían adoptarse medidas que protejan a 500 años vista. Evidentemente queda descartada una protección a 10 años que ha sido calculada como se indicó en el apartado 4 para establecer el cauce del río a reservar en cada una de las tres soluciones que se han evaluado.

5.2.7. Valoración global alternativas

Una vez estudiado todas las características de cada una de las alternativas que se proponen en este estudio, se ha elaborado una tabla resumen que recoge las principales características de cada una de las alternativas desde diferentes puntos de vista como el coste, el riesgo, el impacto visual, integración paisajística o la liberación de suelo urbano. En la Tabla 20, se recogen dichas valoraciones que pueden servir de referencia para tomar una decisión definitiva en cuanto a la solución final a adoptar. Cabe destacar que en determinadas partes del cauce como ya se ha ido indicando no hay otra

solución que establecer un encauzamiento con muros laterales para respetar las construcciones existentes. Asimismo, hay que tener en cuenta que si se adopta una solución mixta han de elaborarse zonas de transición hidráulicamente adecuadas entre las diferentes secciones propuestas.

SOLUCIÓN	Coste	Impacto visual	Integración Paisajística	Aprovechamiento urbano	Riesgo
Cajón	Alto	Alto	Baja	Alto	Alto
Muros laterales	Bajo	Medio	Baja	Medio	Medio
Laguna	Bajo	Bajo	Alta	Bajo	Bajo

Tabla 20 Comparativa de alternativas

En base a los resultados vistos en la Tabla 20, la solución óptima que debería establecerse es aquella que mejor se adapte tanto en el plano hidráulico como en el resto de las variables analizadas. Por ello la solución a elegir, debería ser la combinación de la laguna de inundación con muros laterales y sección cajón en aquellos puntos donde el desarrollo urbanístico actual no permita ganar más espacio al cauce del río.

Una solución que combina las 3 propuestas de mitigación permite adaptar las previsiones de la Tabla 20, para adaptarse en una mejor medida a cada una de las situaciones que se presentan en los casi 12km de cauce que se van a ver afectados.

6. Conclusiones

El objetivo que se trataba de conseguir en este trabajo de fin de grado era la elaboración de medidas de mitigación ante las inundaciones que ocurrían en Santiago de los Caballeros, segunda ciudad más poblada de la República Dominicana y que tras su inclusión en el programa de mejoras del Banco Interamericano de Desarrollo podía llevar a cabo una serie de medidas en el cauce de su principal río el Yaque del Norte que evitaran la repetición de las catastróficas inundaciones acaecidas en años anteriores.

Para ello en este trabajo se ha realizado un estudio de la situación actual desde el punto de vista hidrológico, cuyos resultados de caudales de avenida han sido el punto de partida del estudio hidráulico de 3 soluciones diferentes combinables entre sí que permitían una mitigación de las inundaciones en la trama urbana.

A la vista de los resultados obtenidos en el apartado 5.2.6 y la comparativa realizada en el apartado 5.2.7, la solución económicamente más aconsejable es la de realizar una laguna de inundación adaptando secciones tipo cajón donde los desarrollos urbanísticos actuales no permitan adoptar otro tipo de solución y generando estructuras laterales en otras secciones del río las cuales permiten ganar espacio útil para el enriquecimiento urbanístico de las dotaciones de la ciudad mediante la construcción de sendas y espacios deportivos.

Finalmente se ha decidido además llevar a cabo las medidas para garantizar protección para un periodo de retorno de 500 años. Como se ha justificado las diferencias económicas en la solución a 500 años respecto a la solución de 100 años deberían poder ser asumibles teniendo en cuenta que se garantiza 5 veces más de protección.

El llevar a cabo una solución combinada basada en la ejecución de una laguna de inundación permite además aprovechar las ventajas de las otras dos soluciones propuestas evitando alguno de sus problemas fundamentales como era el elevado riesgo que había que asumir en el caso de realizar un encauzamiento con una sección tipo cajón que presentaba un riesgo muy elevado para la población en caso de desbordamiento [Figura 51].

Así mismo, desde el punto de vista medioambiental el impacto generado por esta solución en los desarrollos urbanísticos realizados es menor que la que se demostraba en otras soluciones propuestas Figura 50.

Económicamente puede suponer un refuerzo positivo para la economía de la ciudad de Santiago de los Caballeros pues esta solución permitiría la liberalización de algunos suelos junto al cauce al no ser necesario destinarlos a zonas inundables lo cual puede generar un retorno económico en la zona.

Por otro lado, cabría realizar un estudio económico más detallado de la solución encontrada para poder acometerla en la práctica además de un estudio del terreno y de los materiales que lo componen.

Es interesante también destacar la necesidad de realizar una integración paisajística correcta y adecuada de la solución finalmente adoptada para poder integrar en el entorno la obra civil a ejecutar.

Por último, a pesar de la efectividad que pueda mostrar una obra como la planteada en el presente estudio, es necesario establecer una zona de protección hidráulica en ambos márgenes del río legislando si fuera necesario para impedir la proliferación de nuevas construcciones junto a las márgenes del Yaque del Norte y ayudando mediante un sistema de subvenciones si fuera necesario a los actuales propietarios para trasladar sus viviendas a zonas no inundables.

7. Bibliografía

Acosta Guzmán, J. A. (2015) 'CRÓNICAS: CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO YAQUE DEL NORTE', *Global Education Magazine*. Available at: <http://www.globaleducationmagazine.com/cronicas-cuenca-hidrografica-del-rio-yaque-del-norte/> (Accessed: 29 June 2018).

Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros (2014) *Demografía de Santiago de los Caballeros República Dominicana*. Available at: <https://santiagodeloscaballeros.gob.do/demografia/> (Accessed: 24 June 2018).

Brunner, G. W. and CEIWR-HEC (2016) 'HEC-RAS River Analysis System User ' s Manual'. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, p. 1442.

Carmona, M. (2015) *EL MODELO HEC-HMS*. Universidad de Sonora. Available at: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20338/Capitulo7.pdf> (Accessed: 30 June 2018).

CEDEX (2014) *HEC-HMS*. Available at: <http://ceh-flumen64.cedex.es/IngSis/hec-hms.htm> (Accessed: 30 June 2018).

Chow, V., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1994) *Hidrología Aplicada*. New York: Mc Graw Hill.

Chow, V. Te (1959) *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.

Climate Data (2018) *Clima Santiago de los Caballeros: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Santiago de los Caballeros* - *Climate-Data.org*. Available at: <https://es.climate-data.org/location/2986/> (Accessed: 23 June 2018).

Demuca, F. (2009) *Estudio Socioeconómico para el Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago*. Santiago de los Caballeros.

Easterling, D. *et al.* (2005) 'Observed Variability and Trends in

Extreme Climate Events: A Brief Review', *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 417–425. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<0417.

Elis, J. et al. (2016) *Guía Metodológica iniciativa ciudades emergentes y sostenibles*. Available at: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8119/Guia-Metodologica-Programa-de-Ciudades-Emergentes-y-Sostenibles-Tercera-edicion.pdf> (Accessed: 21 June 2018).

ESRI (2018) *About ArcGIS | Mapping & Analytics Platform*. Available at: <https://www.esri.com/es-es/arcgis/about-arcgis/overview> (Accessed: 30 June 2018).

Ferrer-Julia, M., Ramirez, J. and Blanco, J. (2014) *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ADAPTACIÓN DEL PARÁMETRO DEL NÚMERO DE CURVA A LAS NUEVAS FUENTES DE DATOS*. León.

Gómez Coma, A. (2018) *Análisis de medidas de mitigación de la inundación urbana mediante elementos de drenaje sostenible. Aplicación a Centroamérica*. Universidad de Cantabria.

Gómez De Travesedo, N., Saenz Ramírez, P. and Ejecutivo, R. (2009) *VI Plan de Acción DIPECHO para El Caribe Análisis de riesgos de desastres y vulnerabilidades en la República Dominicana Documento de contribución al Sistema Nacional de Prevención, Mitigación y Respuesta a Desastres*. Available at: http://ec.europa.eu/echo/files/funding/opportunities/interest_dipecho_7_Rep_Dominicana.pdf (Accessed: 22 June 2018).

Hall, T. C. et al. (2013) 'Future climate of the Caribbean from a super-high-resolution atmospheric general circulation model', *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1–2), pp. 271–287. doi: 10.1007/s00704-012-0779-7.

Handmer, J. and Monson, R. (2004) 'Does a Rights Based Approach Make a Difference? The Role of Public Law in Vulnerability Reduction.', *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, 22(3), pp. 43–59. Available at: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=sih&AN=15588820&lang=ja&site=ehost-live>.

Iban Campo (2007) 'La tormenta Olga deja al menos ocho muertos en República Dominicana | Internacional | EL PAÍS', *El País*, 12 December. Available at: https://elpais.com/internacional/2007/12/12/actualidad/1197414027_850215.html (Accessed: 22 June 2018).

Linsley, R., Kohler, M. and Paulhus, J. (1967) *Hidrología para ingenieros*. Madrid: McGraw-Hill.

Méndez-tejeda, R. *et al.* (2016) 'Climate Variability and Its Effects on the Increased Level of Lake Enriquillo in the Dominican Republicm 2000-2013', *Applied Ecology and Environmental Sciencies*, 4(1), pp. 26–36. doi: 10.12691/aees-4-1-4.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2010) 'Gestión del Riesgo Climático'. New York. Available at: [http://www.undp.org/content/dam/undp/library/crisis-prevention/disaster/Reduccion-Gestion del Riesgo Climatico.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/crisis-prevention/disaster/Reduccion-Gestion-del-Riesgo-Climatico.pdf) (Accessed: 30 June 2018).

Samaniego, J. L. and Galindo, L. M. (2010) *La economía del Cambio Climático en América Latina y el Caribe*. New York. Available at: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2974/S2010992_es.pdf;jsessionid=132792345FCAE8147E07A82AEE3C9C67?sequence=1 (Accessed: 22 June 2018).

Soil Conservation Service (1989) *Hydrology Training Series. Runoff Curve Number Compiutations. Study Guide*. Washington. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1082993.pdf (Accessed: 1 July 2018).

Tatuc, P. *et al.* (2014) *Perfiles Estadísticos Provinciales. Provincia Santiago*. Santiago de los Caballeros.

Tejada, T. (2016) *La presa de Tavera, su historia y sus desfogues, El Caribe*. Available at: <http://www.elcaribe.com.do/2016/12/27/presa-tavera-historia-sus-desfogues/> (Accessed: 30 June 2018).

TRMM NASA (2018) *TRMM Home Page | Precipitation*

Measurement Missions. Available at: <https://pmm.nasa.gov/trmm>
(Accessed: 4 July 2018).

Weatherspark (2016) *Clima promedio en Santiago de los Caballeros, República Dominicana, durante todo el año* - Weather Spark. Available at: <https://es.weatherspark.com/y/26767/Clima-promedio-en-Santiago-de-los-Caballeros-República-Dominicana-durante-todo-el-año> (Accessed: 24 June 2018).